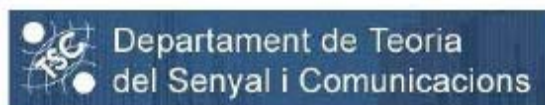


# **Análisis y caracterización del rizado “Scalloping” en imágenes radar ScanSAR y TopSAR**

**PROYECTO FINAL DE CARRERA**

**AUTOR: JORDI LÓPEZ BUSTAMANTE**

**TUTOR: ANTONI BROQUETAS IBARS**



---

***(-PÁGINA EN BLANCO INTENCIONADAMENTE-)***

---

## **AGRADECIMIENTOS**

Quisiera expresar mi agradecimiento a todas las personas que han estado a mi lado y me han apoyado en los malos momentos, y que me han animado a seguir adelante y no detenerme en los buenos momentos.

Entre ellos quisiera agradecer especialmente a mi familia, mis padres y hermanos, además a mis amigos tanto de mi etapa universitaria como de las etapas anteriores de mi vida.

También quisiera mostrar mi agradecimiento a todos los profesores que me han transmitido sus conocimientos y su pasión por aprender y me han inculcado el sentido del trabajo y la responsabilidad.

En especial quisiera agradecer a Antoni Broquetas, director de mi proyecto, a Josep Ruiz y Eduard Makhoul por su disposición siempre que he necesitado de su ayuda.

---

*‘El éxito es una cuestión de perseverar  
cuando los demás ya han renunciado’*

**William Feater**

---

## **Índice De Capítulos**

<b>Capítulo 0: Introducción, objetivos del proyecto y organización de la memoria .....</b>	<b>20</b>
<b>Capítulo 1: Introducción al Radar de Apertura Sintética (SAR) .....</b>	<b>26</b>
1.1. Introducción .....	27
1.2. Radar pulsado .....	27
1.3. Antena .....	28
1.4. RAR vs SAR .....	30
1.4.1. Real Aperture Radar.....	30
1.4.2. Synthetic Aperture Radar .....	33
1.5. StripMAP vs ScanSAR .....	37
1.5.1. StripMAP .....	37
1.5.2. ScanSAR.....	38
1.6. La misión Paz .....	39
1.7. Referencias y Notas.....	41
1.8. Variaciones de nomenclatura .....	43
<b>Capítulo 2: Análisis del error de scalloping en el modo ScanSAR .....</b>	<b>44</b>
2.1. Introducción .....	45
2.2. Descripción teórica del scalloping.....	45
2.2.1. Introducción a ScanSAR .....	45
2.2.2. Parámetros numéricos de scalloping .....	49
2.3. Cálculo del scalloping en Paz con BUMSA.....	51
2.3.1. Introducción .....	51
2.3.2. Pasos para la simulación y el cálculo de scalloping .....	52
2.4. Comparación de resultados entre Paz, Radarsat y Envisat.....	59
2.5. Ejemplo ilustrativo del efecto de scalloping .....	63
2.6. Referencias y notas .....	65
<b>Capítulo 3: Análisis del error de scalloping en el modo TopSAR .....</b>	<b>66</b>
3.1. Introducción .....	67
3.2. Descripción teórica de los modos TopSAR y TopSAR inverso .....	67
3.2.1. Descripción teórica y matemática de TopSAR .....	70
3.2.2. Descripción teórica y matemática de TopSAR inverso .....	73
3.2.3. Realización e implicación de la variación angular.....	74

---

3.3. Estudio de scalloping en TopSAR en Paz con la aplicación BUMSA .....	75
3.3.1. Introducción .....	75
3.3.2. Pasos para el cálculo del scalloping .....	76
3.3.3. Resultados obtenidos .....	87
3.4. Efecto sobre el scalloping de la variación del ancho de haz del diagrama de 1 elemento.....	92
3.4.1. Introducción .....	92
3.4.2. Definición de escenarios en estudio .....	92
3.4.3. Resultados obtenidos en el beam SM1 .....	93
3.4.4. Resultados obtenidos en el beam SM22 .....	94
3.5. Referencias.....	97
<b>Capítulo 4: Comparación entre los modos ScanSAR y TopSAR en Paz y TerraSAR-X.....</b>	<b>98</b>
4.1. Introducción .....	99
4.2. Comparativa para el beam SM22 de Paz .....	99
4.3. Comparativa para todos los beams de Paz .....	103
4.4. Comparativa mediante imágenes de TerraSAR-X .....	104
4.5. Efecto del steering en el número de ráfagas necesarias .....	107
4.6. Referencias.....	110
<b>Capítulo 5: Efecto del scalloping en la aplicación de detección de un barco en mar.....</b>	<b>111</b>
5.1. Introducción .....	112
5.2. Detección de barcos mediante imágenes SAR.....	112
5.2.1. Algoritmo propuesto por Ocean University of China mediante imágenes de ERS.....	112
5.2.2. Algoritmo propuesto por Università degli Studi di Napoli Parthenope mediante imágenes de ERS.....	114
5.2.2. Algoritmo propuesto por Advanced Researches Institute y el National Institute for Space Research mediante imágenes de TerraSAR-X de Brasil .....	116
5.3. Efecto del scalloping en la detección de barcos .....	121
5.4. Referencias.....	123
<b>Capítulo 6: Conclusiones y líneas de trabajo futuro.....</b>	<b>124</b>
6.1. Conclusiones .....	125
6.2. Líneas de trabajo futuro.....	127
6.2.1. TopSAR de alta resolución .....	127
6.2.2. Identificación de barcos en tiempo real .....	127

<b>Capítulo 7: Manual de la aplicación BUMSA (Burst Modes Scalping Analyzer)</b>	<b>130</b>
7.1. Ejecución de la aplicación BUMSA	131
7.2. Descripción del menú de opciones superior	132
7.2.1. Descripción de la opción Options	132
7.2.2. Descripción de opción Analisis Scal Deep	135
7.2.3. Descripción de opción All Beam Analisis	135
7.2.4. Descripción de la opción Exploration Mode	136
7.3. Descripción del subpanel izquierdo-superior	137
7.4. Descripción del subpanel izquierdo-intermedio	138
7.5. Descripción del subpanel izquierdo-inferior	140
7.6. Descripción del subpanel central-izquierdo	140
7.7. Descripción del subpanel de resultados central-derecho	142
7.8. Descripción de panel de graficas derecho	142
7.9. Referencias	143
<b>ANEXOS</b>	<b>144</b>
<b>Anexo 1: Principales misiones en funcionamiento que emplean tecnología SAR</b>	<b>145</b>
TecSAR (TechSAR/Polaris)	145
RISAT-2 (Radar Imaging Satellite 2)	145
COSMO-SkyMed (CONstellation of small Satellites for the Mediterranean basin Observation)	146
SAR-Lupe	146
ALOS / Daichi	147
Yaogan /JB	147
ERS 1 y 2	148
Envisat ASAR ("Environmental Satellite")	149
Radarsat 2	150
Paz	151
TerraSAR-X	151
<b>Anexo 2: Profundidad de scalping para todos los beams de Radarsat en ScanSAR</b>	<b>155</b>
<b>Anexo 3: Profundidad de scalping para todos los beams de Envisat en ScanSAR</b>	<b>161</b>
<b>Anexo 4: Profundidad de scalping para todos los beams de Paz en ScanSAR</b>	<b>166</b>
<b>Anexo 5: Profundidad de scalping para todos los beams de Paz en TopSAR</b>	<b>174</b>
<b>Anexo 6: Analisis de escenarios para Paz TopSAR del beam SM1</b>	<b>181</b>
<b>Anexo 7: Analisis de escenarios para Paz TopSAR del beam SM22</b>	<b>188</b>

---

## Índice De Figuras y Tablas

<i>Fig. 0.1: imagen del pentágono de Sandia Labs.....</i>	<i>21</i>
<i>Fig. 0.2: imagen de Venus tomada con Magellan.....</i>	<i>22</i>
<i>Fig. 0.3: imagen de Venus tomada con Magellan.....</i>	<i>22</i>
<i>Fig. 0.4: Imagen de Mississippi River en Stripmap .....</i>	<i>23</i>
<i>Fig. 0.5: Imagen de Sebangau National Park en ScanSAR .....</i>	<i>23</i>
<i>Fig. 0.6: Imagen de Charles de Gaulle en Spotlight.....</i>	<i>23</i>
<i>Fig. 0.7: Imagen del huracán Helena sobre el Atlántico tomada con Radarsat en ScanSAR .....</i>	<i>24</i>
<i>Fig. 0.8: Sección de rectángulo blanco de la figura 0.7 de 51.2x51.2 km .....</i>	<i>24</i>
<i>Fig. 1.1: Esquema de bloques de un radar pulsado monoestático.....</i>	<i>27</i>
<i>Fig. 1.2: Esquema temporal de la transmisión y recepción de pulsos .....</i>	<i>27</i>
<i>Fig. 1.3: Esquema de una antena lineal .....</i>	<i>28</i>
<i>Fig. 1.4: representación de la antena de TerraSAR-X [ref. 1.1] .....</i>	<i>29</i>
<i>Fig. 1.5: Esquema de medidas de la antena de TerraSAR-X [ref. 1.2] .....</i>	<i>30</i>
<i>Fig. 1.6: Imagen de un Subarray con su módulo TR [ref. 1.1] .....</i>	<i>30</i>
<i>Fig. 1.7: Radar de Apertura Real .....</i>	<i>31</i>
<i>Fig. 1.8: esquema de coordenadas de la antena.....</i>	<i>31</i>
<i>Fig. 1.9: Representación de RAR en movimiento.....</i>	<i>32</i>
<i>Fig. 1.10: Representación real del radar en movimiento .....</i>	<i>32</i>
<i>Fig. 1.11: Representación de la apertura real .....</i>	<i>33</i>
<i>Fig. 1.12: Representación de la apertura sintética.....</i>	<i>33</i>
<i>Fig. 1.13: Geometría de SAR-unfocused .....</i>	<i>35</i>
<i>Fig. 1.14: Comparación del valor de resolución acimutal para los casos de antena real, focused-SAR y unfocused-SAR en función de la distancia al blanco [ref 1.5].....</i>	<i>36</i>
<i>Fig. 1.15: modo de exploración stripmap de Terrasar-X .....</i>	<i>37</i>
<i>Fig. 1.16: modo de exploración ScanSAR de Terrasar-X.....</i>	<i>38</i>
<i>Fig. 1.17: satélite TerraSAR-X .....</i>	<i>40</i>
<i>Fig. 1.18: imagen interferometrica de Paris tomada con TerraSAR-X .....</i>	<i>40</i>
<i>Fig. 1.19: zoom de fig 1.18 .....</i>	<i>40</i>
<i>Tabla 1.1: parámetros de una antena lineal .....</i>	<i>28</i>
<i>Fig. 2.1: ScanSAR de 3 swaths .....</i>	<i>46</i>
<i>Fig. 2.2: diagramas de radiación para Radarsat, Envisat y Paz (beam sm1) .....</i>	<i>46</i>
<i>Fig. 2.3: representación realística de ScanSAR de 3 swaths.....</i>	<i>47</i>
<i>Fig. 2.4: visualización de dos puntos en un swath fijado .....</i>	<i>47</i>
<i>Fig. 2.5: geometría radar/blanco .....</i>	<i>48</i>
<i>Fig. 2.6: secuencia de ecuaciones para obtener <math>\Delta t</math> .....</i>	<i>48</i>
<i>Fig. 2.7: diagrama de radiación y pulsos.....</i>	<i>49</i>
<i>Fig. 2.8: señal recibida visualizando el punto a <math>0^\circ</math> .....</i>	<i>49</i>
<i>Fig. 2.9: perfil de scalloping, Radarsat, 100 puntos y error de doppler centroid de 100 Hz.....</i>	<i>50</i>
<i>Fig. 2.10: perfil de scalloping, Radarsat, all points (1263 puntos o 3 vueltas) y error de doppler centroid de 100 Hz.....</i>	<i>50</i>



<i>Fig. 2.11: profundidad de scalloping, Radarsat, ponderación rectangular (a) e inversa de diagrama en azimut (b) .....</i>	<i>50</i>
<i>Fig. 2.12: aplicación BUMSA(BURst Modes Scalloping Analyzer) .....</i>	<i>51</i>
<i>Fig. 2.13: diagrama de ganancia del beam SM3 sin error (azul), con error (verde) de -100Hz (a) y +100Hz (b) .....</i>	<i>53</i>
<i>Fig. 2.14: tren de pulsos (tiempos en milisegundos) con PRF=3500 pulsos/seg .....</i>	<i>54</i>
<i>Fig. 2.15: ponderación rectangular (a) e inversa de azimut (b) para el beam SM3 .....</i>	<i>54</i>
<i>Fig. 2.16: tren de pulsos y diagrama de ganancia .....</i>	<i>55</i>
<i>Fig. 2.17: tren de pulsos y diagrama de ganancia dentro del margen angular de antena .....</i>	<i>55</i>
<i>Fig. 2.18: visualización del punto tras la selección de pulso .....</i>	<i>56</i>
<i>Fig. 2.19: perfil de scalloping para error de 100 Hz de Doppler centroid.....</i>	<i>56</i>
<i>Fig. 2.20: profundidad de scalloping en función del error de Doppler centroid para ponderación rectangular (verde) .....</i>	<i>57</i>
<i>Fig. 2.21: profundidad de scalloping en función del error de Doppler centroid para ponderación inverso de ganancia (verde).....</i>	<i>57</i>
<i>Fig. 2.22: profundidad de scalloping en función del error de Doppler centroid con ponderación rectangular para todos los beams.....</i>	<i>58</i>
<i>Fig. 2.23: profundidad de scalloping en función del error de Doppler centroid con ponderación inverso de ganancia para todos los beams .....</i>	<i>58</i>
<i>Fig. 2.24: puntos en que se compara la profundidad de scalloping para los métodos rectangular e inverso de ganancia en los satélites Paz(a), Radarsat(b) y Envisat(c) .....</i>	<i>59</i>
<i>Fig. 2.25: imagen tomada de Envisat en modo APM (ref. [2.3]).....</i>	<i>63</i>
<i>Fig. 2.26: ejemplo del efecto del scalloping .....</i>	<i>64</i>
<i>Fig. 2.27: ejemplo del efecto del scalloping .....</i>	<i>64</i>
 <i>Tabla 2.1: descripción de parámetros de geometría.....</i>	 <i>48</i>
<i>Tabla 2.2: valores de las variables para el cálculo del error de centroid para Paz .....</i>	<i>52</i>
<i>Tabla 2.3: resultados para el tiempo de ciclo y la distancia de scalloping.....</i>	<i>53</i>
<i>Tabla 2.4: Tabla comparativa del valor de profundidad de scalloping en dB para Paz, Radarsat y Envisat de todos sus beams .....</i>	<i>61</i>
<i>Tabla 2.5: Tabla comparativa del valor de Laz, Tiempo de ciclo en ms y distancia de scalloping en km para Paz, Radarsat y Envisat de todos sus modos de exploración .....</i>	<i>62</i>
 <i>Fig. 3.1: representación del modo de exploración TopSAR .....</i>	 <i>68</i>
<i>Fig. 3.2: modo TopSAR .....</i>	<i>68</i>
<i>Fig. 3.3: modo TopSAR inverso .....</i>	<i>68</i>
<i>Fig. 3.4: Geometría de TopSAR, observando sólo un ciclo(N=3) .....</i>	<i>69</i>
<i>Fig. 3.5: Geometría de TopSAR, observando diversos ciclo (N=3).....</i>	<i>70</i>
<i>Fig. 3.6: Efecto del tiempo de guarda .....</i>	<i>70</i>
<i>Fig. 3.7: función de steering real (rojo) e ideal (azul) .....</i>	<i>71</i>
<i>Fig. 3.8: diagrama de ganancia de 1 elemento del array (verde) y de ScanSAR (azul) .....</i>	<i>74</i>
<i>Fig. 3.9: Aplicación BUMSA (BURst Modes Scalloping Analyzer) para cálculo de scalloping .....</i>	<i>75</i>
<i>Fig. 3.10: Subarray: prototipo ECE y modelo UPC .....</i>	<i>77</i>
<i>Fig. 3.11: diagrama de radiación de un único elemento del array en azimut.....</i>	<i>77</i>

<i>Fig. 3.12: realización de las 3 primeras conmutaciones del diagrama de ganancia con un steer de 0.008 grados/conmutación.....</i>	<i>78</i>
<i>Fig. 3.13: resultado del diagrama de radiación de ScanSAR parametrizado .....</i>	<i>78</i>
<i>Fig. 3.14: resultado del diagrama de radiación de un elemento del array parametrizado .....</i>	<i>79</i>
<i>Fig. 3.15: función de steering ideal relativa al steering mínimo .....</i>	<i>80</i>
<i>Fig. 3.16: función de steering real relativa al steering mínimo .....</i>	<i>80</i>
<i>Fig. 3.17: función de steering ideal (azul) y función de steering real (rojo) .....</i>	<i>81</i>
<i>Fig. 3.18: función de steering ideal (azul) y función de steering real (verde) absolutas .....</i>	<i>81</i>
<i>Fig. 3.19: tren de pulsos unitarios .....</i>	<i>82</i>
<i>Fig. 3.20: ejemplo de conmutaciones en un swath sin error de Doppler centroid .....</i>	<i>84</i>
<i>Fig. 3.21: ejemplo de conmutaciones en un swath con error de Doppler centroid .....</i>	<i>84</i>
<i>Fig. 3.22: ejemplo de conmutaciones en un swath y el contiguo en azimut .....</i>	<i>85</i>
<i>Fig. 3.23: conmutaciones de diagrama reales (rojo) y extras (negro).....</i>	<i>86</i>
<i>Fig. 3.24: solapamiento entre diagramas y pulsos antes de la discriminación .....</i>	<i>86</i>
<i>Fig. 3.25: solapamiento entre diagramas y pulsos después de la discriminación .....</i>	<i>87</i>
<i>Fig. 3.26: perfil de scalloping TopSAR sin error de Doppler centroid .....</i>	<i>87</i>
<i>Fig. 3.27: perfil de scalloping TopSAR con error de Doppler centroid máximo .....</i>	<i>88</i>
<i>Fig. 3.28: conmutaciones vistas por un punto fijado, en color rojo .....</i>	<i>88</i>
<i>Fig. 3.29: diagrama equivalente TopSAR para un punto fijo .....</i>	<i>89</i>
<i>Fig. 3.30: diagrama de ganancia ScanSAR (azul) y TopSAR (rojo).....</i>	<i>89</i>
<i>Fig. 3.31: diagrama equivalente TopSAR con steering ideal (rojo) y real (azul).....</i>	<i>90</i>
<i>Fig. 3.32: profundidad de scalloping para errores de Doppler centroid entre -150 y 150 Hz .....</i>	<i>90</i>
<i>Fig. 3.33: perfil de scalloping sin error y teniendo en cuenta el elemento de array sin error de Doppler centroid .....</i>	<i>91</i>
<i>Fig. 3.34: perfil de scalloping con error y teniendo en cuenta el elemento de array con error de Doppler centroid .....</i>	<i>91</i>
<i>Fig. 3.35: diagrama de ganancia del elemento único del array para el beam SM1.....</i>	<i>96</i>
<i>Fig. 3.36: diagrama de ganancia del elemento único del array para el beam SM3.....</i>	<i>96</i>
<i>Fig. 3.37: diagrama de ganancia del elemento único del array para el beam SM22.....</i>	<i>96</i>
 <i>Tabla 3.1: Descripción de parámetros de geometría de TopSAR .....</i>	 <i>69</i>
<i>Tabla 3.2: Resultados de profundidad de scalloping para beam SM1 según escenarios.....</i>	<i>94</i>
<i>Tabla 3.3: Resultados de profundidad de scalloping para beam SM22 según escenarios.....</i>	<i>95</i>
 <i>Fig. 4.1: perfil de scalloping, modo ScanSAR, modo SC6, beam SM22, ponderación Rectangular, error Doppler 0 Hz.....</i>	 <i>100</i>
<i>Fig. 4.2: perfil de scalloping, modo TopSAR, modo SC6, beam SM22, ponderación Rectangular, ponderación 1 elemento Rectangular, error 1 elemento 0 Hz.....</i>	<i>100</i>
<i>Fig. 4.3: perfil de scalloping, modo ScanSAR, modo SC6, beam SM22, ponderación Rectangular, error Doppler +150 Hz .....</i>	<i>100</i>
<i>Fig. 4.4: perfil de scalloping, modo TopSAR, modo SC6, beam SM22, ponderación Rectangular, ponderación 1 elemento Rectangular, error 1 elemento +150 Hz..</i>	<i>100</i>
<i>Fig. 4.5: perfil de scalloping, modo ScanSAR, modo SC6, beam SM22, ponderación Inversa, error Doppler 0 Hz .....</i>	<i>101</i>

Fig. 4.6: perfil de scalloping, modo TopSAR, modo SC6, beam SM22, ponderación Rectangular, ponderación 1 elemento Inversa, error 1 elemento 0 Hz .....	101
Fig. 4.7: perfil de scalloping, modo ScanSAR, modo SC6, beam SM22, ponderación Inversa, error Doppler +150 Hz .....	101
Fig. 4.8: perfil de scalloping, modo TopSAR, modo SC6, beam SM22, ponderación Rectangular, ponderación 1 elemento Inversa, error Doppler +150 Hz.....	101
Fig. 4.9: perfil de scalloping, modo ScanSAR, modo SC6, beam SM22, ponderación Rectangular .....	102
Fig. 4.10: perfil de scalloping, modo TopSAR, modo SC6, beam SM22, ponderación Rectangular, ponderación 1 elemento Rectangular .....	102
Fig. 4.11: perfil de scalloping, modo ScanSAR, modo SC6, beam SM22, ponderación Inversa.....	102
Fig. 4.12: perfil de scalloping, modo TopSAR, modo SC6, beam SM22, ponderación Rectangular, ponderación 1 elemento Inversa .....	102
Fig. 4.13: profundidad de scalloping, modo ScanSAR, Todos los modos, todos los beams, ponderación Rectangular .....	103
Fig. 4.14: profundidad de scalloping, modo TopSAR, Todos los modos, todos los beams, ponderación Rectangular, ponderación 1 elemento Rectangular .....	103
Fig. 4.15: profundidad de scalloping, modo ScanSAR, Todos los modos, todos los beams, ponderación Inversa.....	103
Fig. 4.16: profundidad de scalloping, modo TopSAR, Todos los modos, todos los beams, ponderación Rectangular, ponderación 1 elemento Inversa .....	103
Fig. 4.17: Imagen TopSAR tomada por TerraSAR-X sobre Toulouse .....	104
Fig. 4.18: Imagen Inverse TopSAR tomada por TerraSAR-X sobre Toulouse.....	104
Fig. 4.19: Imagen TopSAR tomada por TerraSAR-X sobre Tolouse .....	105
Fig. 4.20: Imagen Inverse TopSAR tomada por TerraSAR-X sobre Tolouse.....	105
Fig. 4.21: Imagen ScanSAR tomada por TerraSAR-X sobre Tolouse.....	105
Fig. 4.22: Imagen de Challans de Google Maps .....	106
Fig. 4.23: Imagen de Challans tomada por TerraSAR-X en TopSAR 9 Julio 2007 .....	106
Fig. 4.24: Imagen de Challans tomada por TerraSAR-X en ScanSAR el 2 de Sept. de 2007 .....	106
Fig. 4.25: Efecto de la conmutación angular en el margen angular de TopSAR frente al de ScanSAR .....	107
Fig. 4.26: Numero de ráfagas necesarias en ScanSAR (rojo o arriba) frente TopSAR (azul o debajo).....	108
Fig. 4.27: Imágenes tomadas en ScanSAR (arriba) y TopSAR (debajo) .....	108

Tabla 4.1: Valores de Tiempo de Ráfaga y Tiempo de Observación (Dwell Time) para ScanSAR y TopSAR (resolución 20m) para Paz.....	109
--	-----

Fig. 5.1: imagen SAR tras calibración NRCS .....	113
Fig. 5.2: Resultado de la clasificación.....	113
Fig. 5.3: Imagen tomada con ERS.....	115
Fig. 5.4: Imagen tomada con ERS.....	115
Fig. 5.5: función de distribución K teórica y función de distribución real de la imagen .....	118
Fig. 5.6: Agosto 2008; imagen original e imagen tras la detección .....	120

---

<i>Fig. 5.7: Falsa alarma producida por nubes .....</i>	<i>120</i>
<i>Fig. 5.8: imagen SAR tras calibración NRCS y tras clasificación .....</i>	<i>121</i>
<i>Fig. 5.9: Imagen tomada con Radarsat .....</i>	<i>121</i>
<i>Fig. 5.10: imagen SAR tras calibración NRCS .....</i>	<i>122</i>
<i>Fig. 5.11: imagen SAR tras clasificación, Detección aún es posible .....</i>	<i>122</i>
<i>Fig. 5.12: imagen SAR tras clasificación, Detección es imposible .....</i>	<i>122</i>
<i>Tabla 5.1: Resultado del agrupamiento (clustering) de píxeles antes del filtro morfológico....</i>	<i>114</i>
<i>Tabla 5.2: Resultado del agrupamiento de píxeles después del filtro morfológico.....</i>	<i>114</i>
<i>Tabla 5.3: Resultados de la estimación de parámetros del barco.....</i>	<i>114</i>
<i>Tabla 5.4: parámetros estadísticos .....</i>	<i>118</i>
<i>Tabla 5.5: umbral en función del ángulo de incidencia.....</i>	<i>119</i>
<i>Tabla 5.6: resultados de la detección.....</i>	<i>119</i>
<i>Fig. 6.1: ScanSAR – Ponderación Rectangular.....</i>	<i>125</i>
<i>Fig. 6.2: TopSAR – Ponderación Rectangular .....</i>	<i>125</i>
<i>Fig. 6.3: ScanSAR – Ponderación Inverso de Ganancia en Azimut .....</i>	<i>126</i>
<i>Fig. 6.4: imagen ScanSAR tomada por TerraSAR-X sobre Toulouse.....</i>	<i>126</i>
<i>Fig. 6.5: imagen TopSAR tomada por TerraSAR-X sobre Toulouse .....</i>	<i>126</i>
<i>Fig. 6.6: identificación de barcos con 2 satélites trabajando en pseudo-tandem.....</i>	<i>128</i>
<i>Fig. 6.7: identificación de barcos con 3 satélites trabajando en pseudo-tandem.....</i>	<i>129</i>

---

## Descripción de Variables y Símbolos

### Capítulo 1

**PRF (Pulse Repetition Frequency):** Número de pulsos por segundo que transmite el radar, su valor puede darse en Hz.

**PRI (Pulse Repetition Interval):** Periodo de Repetición de Pulso: intervalo temporal entre 2 pulsos consecutivos.

$\tau$ : Duración de un pulso

**$\Delta t$ :** Intervalo temporal entre la transmisión del pulso y la recepción de su eco, se calcula como:  $2 \cdot \frac{\text{distancia}}{c}$

**c:** Velocidad de la luz en el vacío o el aire= $3 \cdot 10^8$  m/s

**$X_r$ :** Resolución en la dirección range o distancia (ecuación 1.2)

**$X_a$ :** Resolución en la dirección acimut (ecuación 1.1, 1.8, 1.11)

**h:** Distancia entre el satélite y la superficie terrestre, tomando el punto más cercano al satélite o en la dirección perpendicular a la superficie

**L:** Longitud de la antena en la dirección de vuelo o acimut

**W:** Anchura de la antena en la dirección perpendicular al vuelo

**$\theta$ :** Ángulo de inclinación del diagrama de radiación de la antena en la dirección range

**$\theta_r$ :** Ancho de haz del corte en la dirección de range (o distancia) del diagrama de radiación de la antena

**$\theta_a$ :** Ancho de haz del corte en la dirección de acimut del diagrama de radiación de la antena (ecuación 1.4)

**S:** Anchura del área observada por el radar o swath (ecuación 1.3)

**L:** Longitud de la antena real, de un elemento del array en cuyo caso, en la dirección de vuelo o acimut

**$L_T$ :** Longitud total del conjunto de elementos que forman el array

---

**$L_e$** : Longitud de la antena sintética realizada mediante procesado SAR (ecuación 1.7 y 1.10)

**$\theta_a$** : Anchura del diagrama real de antena (ecuación 1.4)

**$\theta_s$** : Anchura del diagrama equivalente de la apertura sintética obtenida mediante procesado SAR (ecuación 1.5)

**$\lambda$** : Longitud de onda  $= \frac{c}{f}$

## **Capítulo 2**

**$V_{sc}$** : Velocidad de vuelo del satélite

**$V_b$** : Velocidad del blanco visto por el radar o proyección de la velocidad del satélite en la superficie terrestre (ecuación 2.3)

**$R_e$** : Radio de la Tierra

**$R$** : Distancia entre el radar y el blanco observado (ecuación 2.6)

**$R_s$** : Distancia entre el centro de la Tierra y el radar ( $R+h$ )

**$\theta_e$** : Ángulo formado entre  $R$  y  $R_s$  (ecuación 2.4)

**$\theta$** : Ángulo complementario formado por  $R$  y  $R_e$  (ecuación 2.5)

**$\alpha$** : Ángulo formado entre  $R_s$  y  $R_e$  (ecuación 2.3)

**$\Delta\Phi$** : Variación angular, por ejemplo del diagrama de radiación o del error de Doppler centroid (ecuación 2.2)

**$\Delta t$** : Duración temporal, por ejemplo del diagrama de radiación, o por ejemplo si  $\Delta\Phi$  corresponde con el error de Doppler centroid

**$L_{az}$** : Número de veces que un punto de la escena es visualizado por el radar (ecuación 2.1)

**$T_c$** : Tiempo de ciclo del modo, se obtiene como la suma de los tiempos de ráfaga

**$\Delta x$** : Distancia entre las líneas de scalloping máximo (ecuación 2.7)

**$P$** : Potencia de la señal recibida por el radar que proporciona uno o diversos puntos (ecuación 2.8)

---

**$\Delta f_{\text{Dop}}$** : Error de Doppler centroid (ecuación 2.10)

**$\Delta \xi$** : Error en grados o radianes, típicamente provocado por  $\Delta f_{\text{Dop}}$  (ecuación 2.11)

**$V_{\text{sc}}$** : Velocidad del radar

**$\lambda$** : Longitud de onda

**$T$** : Periodo de rotación del satélite

**$T_e$** : Periodo de rotación de la Tierra

**$\Psi$** : Inclinación de la órbita

**$T_c$** : Tiempo de ciclo del modo, se obtiene como la suma de los tiempos de ráfaga de los beams que forman el modo.

**$\tau_j$** : Duración temporal de una ráfaga de pulsos

**Perfil de scalloping**: Valor de la potencia de scalloping para el conjunto de puntos de la escena analizada

**Profundidad de scalloping**: Máximo valor del perfil de scalloping

**Doppler centroid**: Frecuencia Doppler estimada del centro del haz. Su valor ideal debería ser 0 pero debido a derivas de estimación de la actitud o el posicionamiento del satélite este valor se estima con una cierta variación angular.

**Dirección acimut**: Dirección paralela a la línea de vuelo del satélite

**Dirección range**: Dirección perpendicular a la línea de vuelo del satélite. También se conoce como dirección de elevación.

**Modo StripMAP**: Modo típico de un radar en que se explora la escena sin realizar ninguna variación angular determinada.

**Modo ScanSAR**: Modo de exploración en que se conmuta el ángulo de incidencia en la dirección de range tras realizar una ráfaga de pulsos.

**Modo TopSAR**: Modo equivalente a ScanSAR en que se realiza una conmutación angular en forma de barrido en la dirección acimutal

**Modo Spotlight**: Modo en que se realiza una variación angular del diagrama de radiación en la dirección opuesta al movimiento del satélite con el objetivo que la escena observada, o swath, permanezca fijado en tierra.

---

### **Capítulo 3**

**sinc:** Función definida como  $\text{sinc}(x) = \frac{\sin(\pi \cdot x)}{\pi \cdot x}$  cuyo valor es 1 cuando  $x$  es igual a 0 y  $\frac{\sin(\pi \cdot x)}{\pi \cdot x}$  cuando  $x$  es distinto de 0.

**$k_\theta$ :** Steering rate o tasa de conmutación en ángulos por segundo para el modo TopSAR. Se calcula a partir de la resolución acimutal deseada (ecuación 3.5 y 3.6)

**$T_B$ :** Tiempo de ráfaga en que el radar visualiza un área de superficie o swath

**$T_R$ :** Tiempo de ciclo. Corresponde con la suma de los tiempos de ráfaga de los beams que forman el modo (ecuación 3.7)

**$r_{\text{mid}}$ :** Distancia media entre el satélite y el swath en observación (ecuación 2.6)

**$\Delta\theta$ :** Incremento angular realizado en cada conmutación

**$h_{\text{sat}}$ :** Distancia del satélite al punto de nadir

**$V_s$ :** Velocidad de desplazamiento del satélite

**$T_G$ :** Tiempo de guarda que se emplea para controlar el posible solapamiento de los swaths en acimut

**$\Delta\theta$ :** Incremento angular realizado en cada conmutación

**$G_T$ :** Conjunto de diagramas de ganancia que observan una escena en modo TopSAR (ecuación 3.1)

**$G_0$ :** Ganancia máxima

**$L$ :** Longitud de la antena en la dirección de vuelo o acimut

**$v$ :** (ground velocity) Velocidad del blanco visto por el radar o proyección de la velocidad del satélite en la superficie terrestre (ecuación 2.3)

**$\tau$ :** Variable de tiempo lento o dirección acimut

**$\lambda$ :** Longitud de onda

**$R_0$ :** Distancia del radar al centro del swath (ecuación 2.6)

**$\theta(\tau)$ :** Ángulo de conmutación o rotación de la antena en función del tiempo lento



---

$k_\theta$ : Tasa de conmutación angular, en grados por segundo, para el modo TopSAR (ecuación 3.5 y 3.6)

$\alpha$ : Factor en que aumenta la resolución TopSAR respecto StripMAP (ecuación 3.3)

$\rho_{az}^{TOPS}$ : Resolución en acimut del modo TopSAR (ecuación 3.4)

$\rho_{az}^{STRIP}$ : Resolución en acimut del modo StripMAP. Su valor se calcula como  $\frac{\lambda}{2 \cdot \theta_0}$

$\theta_0$ : Ancho de haz del diagrama de ganancia de SAR

$k_{i\theta}$ : Tasa de conmutación angular, en grados por segundo, para el modo TopSAR Inverso (ecuación 3.10 y 3.11)

**steer\_rate** ( $k_\theta$ ): Tasa de conmutación angular, en grados por segundo, para el modo TopSAR (ecuación 3.5 y 3.6)

**burst\_time** ( $T_B$ ): Tiempo de ráfaga en que el radar visualiza un área de superficie o swath

**steer\_max**: Intervalo angular de conmutación máximo que realiza el radar en un tiempo de ráfaga. Su valor es el producto de burst\_time y steer\_rate

$$\text{steer\_max} = k_\theta \cdot T_B$$

**dwel\_time** ( $T_D$ ): Tiempo en que el diagrama de ganancia de la antena está visualizando un punto de la escena. En TopSAR  $T_D$  es menor a  $T_B$ , en ScanSAR son iguales. Su valor en TopSAR se calcula mediante las 2 siguientes ecuaciones

$$k_R = -\frac{v_s^2}{\lambda \cdot R_0}$$

$$T_D = v_s \frac{k_w}{|k_R| \cdot \rho_{az}} = \frac{k_w \cdot \lambda \cdot R_0}{v_s \cdot \rho_{az}}$$

$k_R$ : Tasa de frecuencia Doppler

$k_w$ : Factor de corrección cercano a 1 que depende de la ventana superpuesta en el espectro del blanco para conseguir los niveles de lóbulos laterales especificados. En la aplicación BUMSA el valor de  $k_w$  es de 1.132.

$T_{\text{dwell}}$ : dwell time

---

$T_R$ : Tiempo de ciclo, se obtiene como la suma de los tiempos de ráfaga más un tiempo de guarda que controla el solapamiento de los swath en acimut (ecuación 3.7)

$G_T$ : Conjunto de diagramas de ganancia que observan una escena en modo TopSAR (ecuación 3.1)

$G_0$ : Ganancia máxima

$L$ : Longitud de la antena en la dirección de vuelo o acimut

$v$ : (ground velocity) Velocidad del blanco visto por el radar o proyección de la velocidad del satélite en la superficie terrestre (ecuación 2.3)

$\tau$ : Variable de tiempo lento o dirección acimut

$\lambda$ : Longitud de onda

$R_0$ : Distancia del radar al centro del swath (ecuación 2.6)

**factor**: Parámetro que se emplea para parametrizar los distintos diagramas de ganancia en el modo TopSAR.

## **Capítulo 5**

**NCRS (Normalized Radar Cross Section)( $\sigma^0$ )**: Es igual a la RCS (radar cross section o sección recta radar) dividida por el área efectiva del blanco

**CFAR (Constant False Alarm Rate)**: Propiedad de los algoritmos de detección que se basan en la utilización de umbrales para evitar que el ruido o clutter provoquen una detección errónea. Dichos algoritmos son adaptativos a las variaciones en las condiciones de ruido y clutter.

**Periodo orbital**: Es el tiempo que emplea un satélite en dar una vuelta completa alrededor de la Tierra.

**ELINT (Electronic Intelligence)**: Tecnología de adquisición de información por medios electrónicos, típicamente de datos de posicionamiento de radares, sistemas antimisiles, aeronaves, etc... también permite perturbar o engañar sistemas electrónicos rivales. A diferencia de las tecnologías de Inteligencia de señales (SIGINT) no se analiza el mensaje sino su emisión electromagnética con el objetivo de obtener el tipo de emisión y su localización

---

**Orbita heliosíncrona:** Órbita de tipo baja entre 600 y 800 km. Su plano orbital está sincronizado con el Sol quedando el Sol en la dirección perpendicular a dicho plano.

**Misión GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment):** Misión desarrollada por NASA que consta de dos satélites iguales lanzados en 2002 que realizan medidas de alta precisión del campo gravitatorio terrestre.

**Capítulo 0**  
**Introducción,**  
**objetivos del proyecto**  
**organización de la memoria**

La tecnología de radar de apertura sintética (SAR) se basa en el procesado de múltiples observaciones realizadas por el radar. Es ampliamente utilizada sobretodo en aplicaciones de observación de la tierra (remote sensing) ya que permite obtener imágenes de una alta resolución como la que se puede observar en la figura 0.1 tomada por Sandia National Laboratory.



*Fig. 0.1: imagen del pentágono de Sandia Labs*

Básicamente su funcionamiento consiste en realizar diversas observaciones para obtener una imagen de una resolución de metros mientras que el Radar de Apertura Real (RAR), supone obtener una imagen por cada observación pero con una resolución que, en el caso de satélites, puede llegar a ser del orden de kilómetros, ([ref. 1.13] capítulo 12 ó [ref. 1.4] capítulo 7)

Sin embargo, dicha tecnología requiere que el radar esté en movimiento ya que los algoritmos se basan en las variaciones de la frecuencia Doppler y las variaciones angulares con que se observan los blancos bajo unas condiciones definidas en el apartado 1.4.2, página 33, y el procesado de los datos debe realizarse en tierra debido al coste computacional de éstas.

En cuanto a su historia en la siguiente tabla se pueden encontrar los hitos más relevantes relacionados con la evolución de dicha tecnología.

Fecha	Evento
1951	Carl A. Wiley de Goodyear Aircraft Corporation propone el concepto de enfoque de haz mediante información de frecuencia Doppler para mejorar la resolución de las imágenes radar
1952	Universidad de Illinois demuestra el concepto propuesto por C. Wiley
1957	Primera imagen SAR con un correlador óptico, Universidad de Michigan
1964	Universidad de Michigan demuestra la correlación de SAR en tiempo no real con electrónica analógica
1969	Hughes, Goodyear y Westinghouse demuestran la correlación de SAR en tiempo

	no real con electrónica digital
1972	Demostración SAR digital en tiempo real con compensación de movimiento (en aviones)
1978	JPL SEASAT, primer satélite SAR de la NASA, enlace de descarga analógico, óptico y procesado digital en tiempo no real
1981	Comienza la serie Shuttle Imaging Radar con SIR-A, procesado óptico en tiempo no real en tierra
1984	SIR-B, enlace de descarga digital, procesado digital en tiempo no real en tierra
1986	Se demuestra el procesado en tiempo real de datos SAR en satélite empleando el procesador JPL Advanced Digital SAR processor (ADSP)
1987	Se pone en órbita un satélite SAR soviético
1990	Imágenes de Venus con satélite SAR Magellan (fig. 0.2 y 0.3)
1990-2011	Expansión de las misiones SAR satelitales; ALMAZ(1990);ERS-1(1991);JERS-1(1992);Radarsat(1994),SIR-C(1993-97),SRTM(2000),TerraSAR-X(2007)

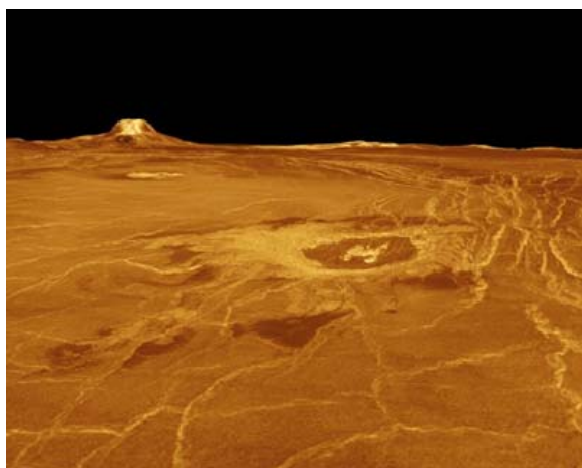
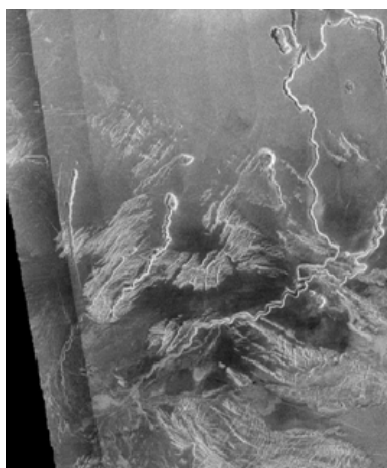
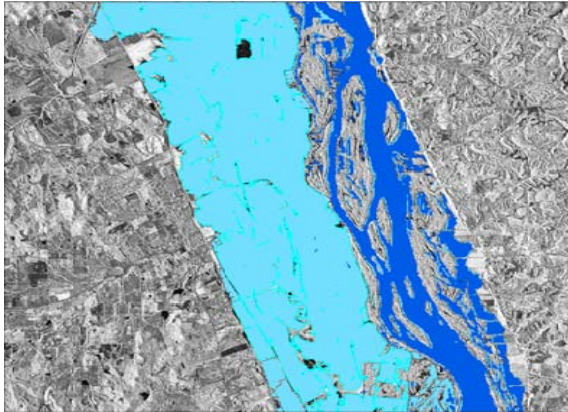


Fig. 0.2: imagen de Venus tomada con Magellan      Fig. 0.3: imagen de Venus tomada con Magellan

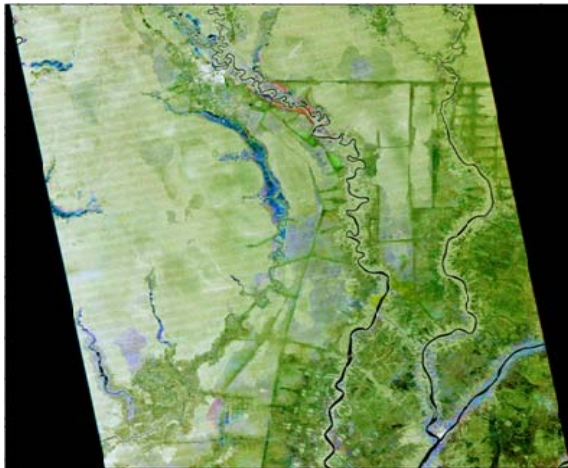
Como posteriormente se detallará, una acción habitual de los satélites que incorporan un radar es la de variar el ángulo de incidencia del haz de antena en una dirección concreta para explorar superficies de mayor tamaño en una sola pasada del satélite a costa de empeorar la resolución. Dicha operación se conoce como modo de exploración ScanSAR (fig. 0.4) (ref. [1.16] capítulo 3.9 y ref. [1.17] página 20) y permite observar superficies del orden de centenares de kilómetros de extensión con resoluciones del orden de los 10 metros en una única pasada del satélite frente a las decenas de kilómetros y unos pocos metros de resolución que se obtendría en el caso de no realizar dicha variación angular, lo que se conoce como modo StripMAP (fig. 0.5). Existe otra opción que es variar el ángulo de incidencia pero con el objetivo de fijar la superficie que observará el radar durante el mayor tiempo posible, dicho modo se denomina Spotlight (fig. 0.6) ([ref. 1.4] capítulo 33, ref. [1.16] capítulo 3.10 y ref.

[1.17] página 20) y permite observar superficies de pocos kilómetros de extensión con resolución de alrededor del metro.



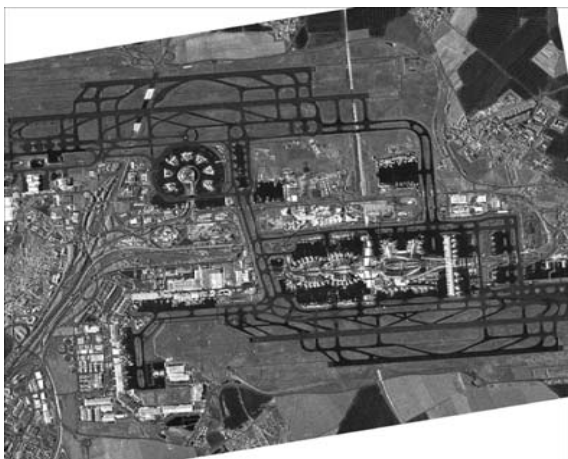
*Fig. 0.4:*

- Nombre Imagen: Mississippi River
- Localización: Mississippi River cerca de Star City, USA
- Satélite: TerraSAR-X
- Fecha: 23 and 24 June 2008
- Modo de exploración: Stripmap
- Resolución: 6.5m
- Copyright: Infoterra GmbH



*Fig. 0.5:*

- Nombre Imagen: Sebangau National Park
- Localización: Palangkaraya, Kalimantan, Indonesia
- Satélite: TerraSAR-X
- Fecha: 14 Febrero, 14 y 25 Junio 2008
- Modo de exploración: Multitemporal ScanSAR
- Resolución: 18.1m
- Copyright: Infoterra GmbH



*Fig. 0.6:*

- Nombre Imagen: Charles de Gaulle, Airport
- Localización: Charles de Gaulle Airport,
- Paris, Francia
- Satélite: TerraSAR-X
- Fecha: 07 June 2008
- Modo de exploración: High Resolution SpotLight
- Resolución: 2.4m
- Copyright: Infoterra GmbH

Básicamente la tecnología SAR se emplea en aplicaciones de teledetección y observación de la Tierra ya que permite realizar dichas aplicaciones independientemente de las condiciones meteorológicas y de la hora del día, a diferencia de los sistemas ópticos.

Entre las aplicaciones en que se puede emplear SAR están, de forma resumida:

- Cartografía y cartografía de alta resolución.
- Geología, hidrología, exploración minera y petrolera.
- Detección de los movimientos de superficie: actividad sísmica, deslizamientos del terreno y subsidencia.
- Aplicaciones marítimas: vigilancia del tráfico marítimo, de las rutas pesqueras, del tráfico no legal de barcos y detección de la contaminación marina.
- Control de hielos.
- Gestión de riesgos: inundaciones e incendios de bosques.
- Agricultura y bosques: detección del estado de crecimiento de la vegetación, de las variaciones en la humedad del suelo y control de la deforestación.
- Análisis del tráfico rodado de una ciudad
- Control de la edificación de una ciudad
- Vigilancia, defensa e inteligencia.

El modo de exploración ScanSAR tiene como inconveniente la aparición de unas franjas indeseadas en la imagen que se deben a una alteración espacial en la sensibilidad radiométrica conocida como scalloping. Dicho efecto se puede observar en la figura 0.8 que corresponde a un zoom de la figura 0.7. Este efecto también puede observarse en la imagen de la figura 0.5.

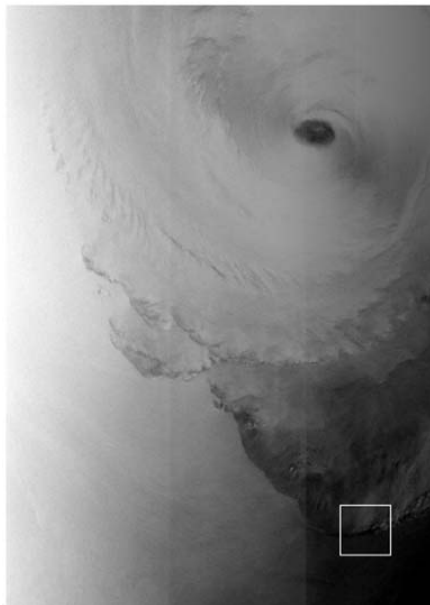


Fig. 0.7: Imagen del huracán Helena sobre el Atlántico tomada con Radarsat en ScanSAR 20 de setiembre de 2006.  
Swath completo de 467x670 km

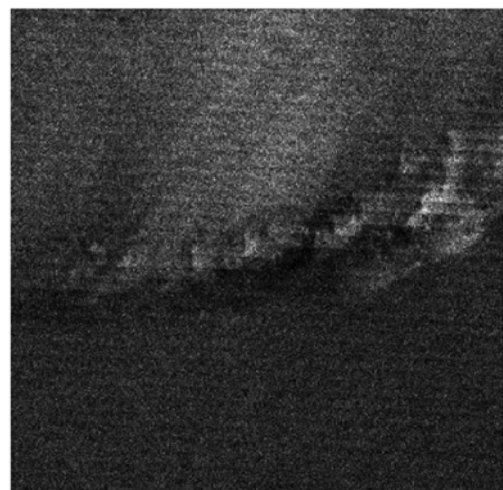


Fig. 0.8: Sección de rectángulo blanco de la figura 0.7 de 51.2x51.2 km



El objetivo del presente proyecto es analizar y cuantificar dicha alteración espacial en la sensibilidad radiométrica, de ahora en adelante scalloping. Dicho efecto además de causar la aparición de franjas no deseadas puede influir también en la medida de algún parámetro obtenido a partir de la medida de la intensidad de la señal.

Para poder obtener una cuantificación numérica de dicho efecto se ha diseñado una aplicación bajo la plataforma Matlab denominada BUMSA (BURst Modes Scalloping Analyzer), que consiste en una interfaz gráfica que permite seleccionar tres satélites, Radarsat, Envisat y Paz y proporciona valores cuantitativos tanto del perfil de scalloping para diversos puntos como de la profundidad de éste, tal como se detallará en los capítulos correspondientes.

La presente memoria está organizada en 7 capítulos principales y otro de anexos.

Para comenzar en el primer capítulo se introducen conceptos básicos relacionados con radar como radar pulsado, SAR, ScanSAR, etc. así como detalles acerca del proyecto ECE Paz.

En el segundo capítulo se introduce de forma teórica, matemática y práctica el concepto de scalloping y se cuantifica en el modo de exploración ScanSAR.

En el tercero se introduce un nuevo modo de exploración denominado TopSAR, diseñado específicamente para eliminar el scalloping, y se analiza el efecto del scalloping en dicho modo.

En el cuarto capítulo se realiza una comparación entre los modos ScanSAR y TopSAR mediante graficas obtenidas con BUMSA y con imágenes obtenidas de satélites como Radarsat o TerraSAR-X.

En el quinto capítulo se introducen 3 métodos para realizar la detección de barcos mediante imágenes SAR y se analiza el impacto del scalloping sobre esta aplicación.

El capítulo 6 corresponde con el capítulo de conclusiones y líneas futuras y el séptimo con el manual de usuario de BUMSA.

En el capítulo de anexos se pueden encontrar los resultados de scalloping detallados numéricamente y gráficamente, así como un resumen de las principales misiones que emplean tecnología SAR.

# **Capítulo 1**

## **Introducción al**

## **Radar de Apertura**

## **Sintética (SAR)**

## 1.1. Introducción

En este capítulo se realiza una introducción a los radares de imagen de tipo SAR, los cuales están embarcados en plataformas móviles como satélites o aviones.

La técnica SAR se basa en procesar los pulsos recogidos por el radar en movimiento, por lo cual se introduce primero, de forma básica, el funcionamiento de un radar pulsado, las propiedades de una antena, la descripción de radar de apertura real y sintética, el funcionamiento de los distintos modos de exploración de un radar y se concluye el capítulo con una breve descripción de la misión ECE Paz

## 1.2. Radar pulsado

El siguiente esquema es el seguido por un radar pulsado genérico.

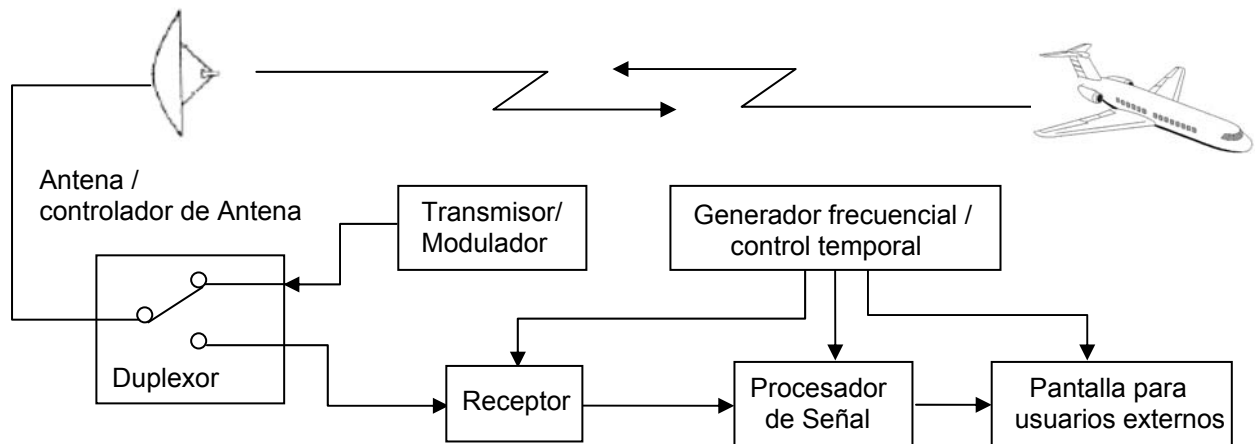


Fig. 1.1: Esquema de bloques de un radar pulsado monoestático

El funcionamiento de un radar pulsado consiste en la transmisión repetida de pulsos de señal electromagnética distanciados temporalmente cada  $\frac{1}{PRF}$ . El radar debe recibir el eco de un pulso antes de transmitir el siguiente para que no se genere una ambigüedad, este hecho hace que la distancia máxima a la que puede estar situado el blanco sea un factor clave a la hora de seleccionar el valor de PRF

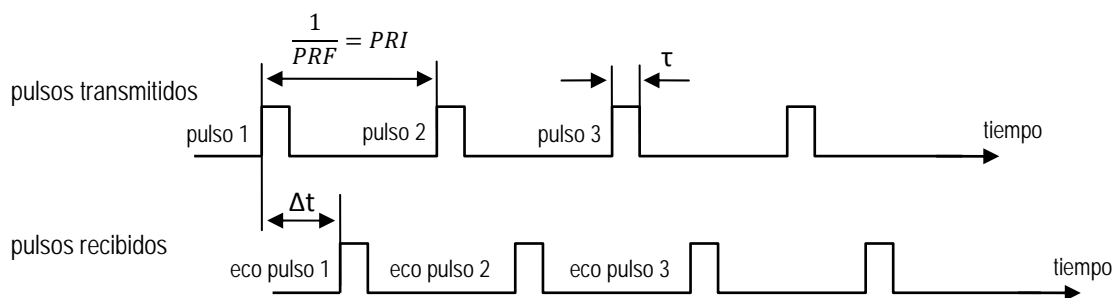


Fig. 1.2: Esquema temporal de la transmisión y recepción de pulsos

Tras la recepción de diversos pulsos el radar los integra para aumentar la SNR o la probabilidad de detección, pudiéndose integrar de forma coherente (módulo y fase), incoherente (módulo) o binaria (suma del número de detecciones de forma binaria).

Los radares pulsados permiten obtener medidas de distancias a partir del tiempo de llegada del eco (toa) y la velocidad del blanco a partir de la medida de la frecuencia Doppler de la señal recibida. Radares más avanzados son capaces de determinar el tipo de blanco, de que material está compuesto o incluso realizar una imagen 3D de éste mediante técnicas como polarimetría o interferometría (nota 1).

Aunque los radares pulsados permiten la medida de la velocidad de un blanco, en el caso de que el propósito del radar sea únicamente éste es más conveniente la utilización de radares de onda continua ya que pueden producir un tono de pureza espectral superior al radar pulsado y el error en la medida del Doppler será inferior.

### 1.3. Antena

En la tabla 1.1 se observan las propiedades básicas del diagrama de radiación de una antena lineal situada en un eje unidimensional y de longitud  $D$  como se muestra en la figura 1.3.

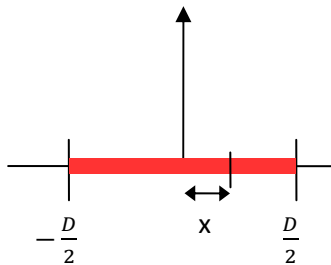


Fig. 1.3: Esquema de una antena lineal

Distribución	$a(x)$ (ecuación de distribución)	Haz a -3dB $\theta_{-3}$	Nivel de Lóbulo Principal a Segundo (dB)
Uniforme	1	$0.88 \cdot \frac{\lambda}{D}$	-13.2
Lineal	$1 - 2 \cdot \frac{ x }{D}$	$1.28 \cdot \frac{\lambda}{D}$	-26.4
Square cosine	$\cos^2(\pi \cdot \frac{x}{D})$	$1.45 \cdot \frac{\lambda}{D}$	-32

Tabla 1.1: parámetros de una antena lineal

Dado que el radar utiliza la antena para transmitir pulsos y recibir los ecos, el ancho de haz se considera habitualmente entre los puntos a -6dB y el NLPS es el cuadrado, o el doble en dB, del valor mostrado en la tabla.

Las prestaciones de resolución en acimut son mejores con una directividad mayor o lo que es lo mismo un ancho de haz menor. Para conseguirlo debe aumentarse el tamaño de antena  $D$ , pero esto en la práctica es altamente complejo ya que, tomando el caso de reflectores parabólicos, la distancia focal (entre el centro del reflector y la antena) y el diámetro del reflector deben cumplir unas relaciones (nota 2) que a altos tamaños puede llegar a imposibilitar tanto su fabricación como su instalación en satélites o aviones.

Para conseguirlo en la práctica se emplea una agrupación (array) que consiste en un conjunto de antenas de menor tamaño equiespaciadas en una o dos dimensiones y con una alimentación de cada elemento que puede variarse. El resultado obtenido es equivalente al de una única antena del mismo tamaño de fabricación realizable. Este tipo de antenas se les conoce como Phased-Array y la gran mayoría de radares actuales, especialmente los montados en satélites, las emplean.

Como ejemplo de este tipo de antenas, la fig. 1.4 muestra una representación de la antena del satélite radar de órbita baja (LEO) TerraSAR-X [ref. 1.3].

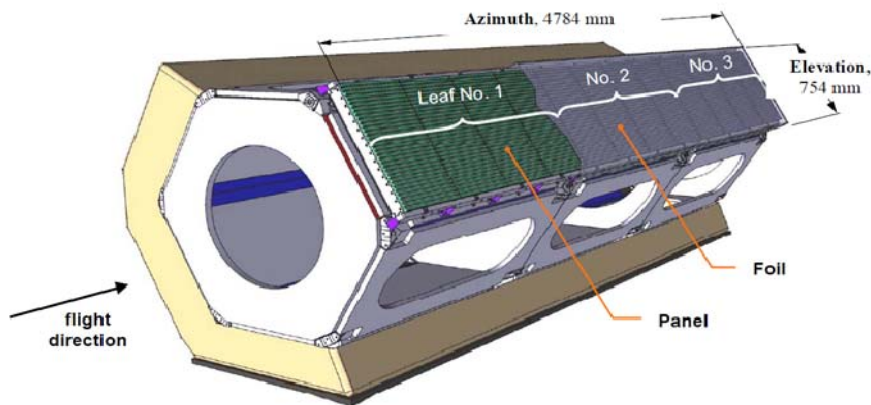


Fig. 1.4: representación de la antena de TerraSAR-X [ref. 1.1]

Este tipo de estructuras permiten obtener valores de ganancia altos con unas dimensiones de antena aceptables, además de capacitar al radar de herramientas avanzadas de transmisión, configurando de forma apropiada la alimentación de las antenas, como la formación de haz variable o la variación del ángulo de incidencia del haz en tiempo real (nota 3).

La antena de TerraSAR-X mostrada en la figura 1.4 está dividida en 3 paneles. Cada panel a su vez está compuesto de 4 subpaneles. Cada subpanel contiene 32 subarrays en elevación. En este caso cada subarray consiste en una guía de onda, como la que puede observarse en la figura 1.6, pero también podría estar formado por otras estructuras como antenas de tipo parche. En total la antena está formada por 384 subarrays.

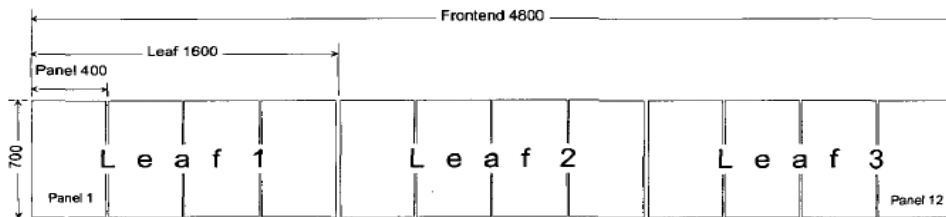


Fig. 1.5: Esquema de medidas de la antena de TerraSAR-X [ref. 1.2]

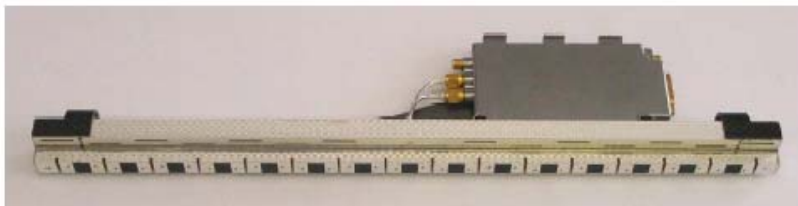


Fig. 1.6: Imagen de un Subarray con su módulo TR [ref. 1.1]

## **1.4. RAR vs SAR**

### **1.4.1. Real Aperture Radar**

Un radar de apertura real (RAR o Real Aperture Radar) es aquel que por cada visualización se obtiene una imagen procesando los ecos correspondientes a una única matriz de ecos, como se representa en la figura 1.7. En este caso la resolución acimutal es proporcional a la distancia entre el satélite y la superficie visualizada, siendo típicamente de unos 200 metros en el caso de avion y 4 km en el caso de satélites. Siendo  $\theta_a$  el ancho de haz en el plano acimutal la resolución se obtiene mediante la expresión (1.1), siendo L y W las dimensiones de la antena en acimut y en elevación respectivamente tal como se muestra en la figura 1.8.

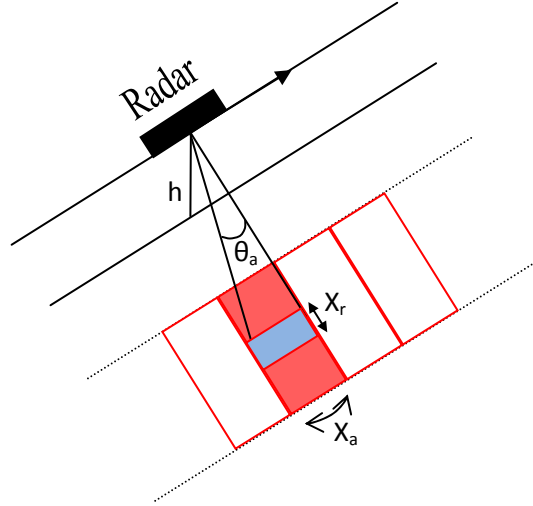


Fig. 1.7: Radar de Apertura Real

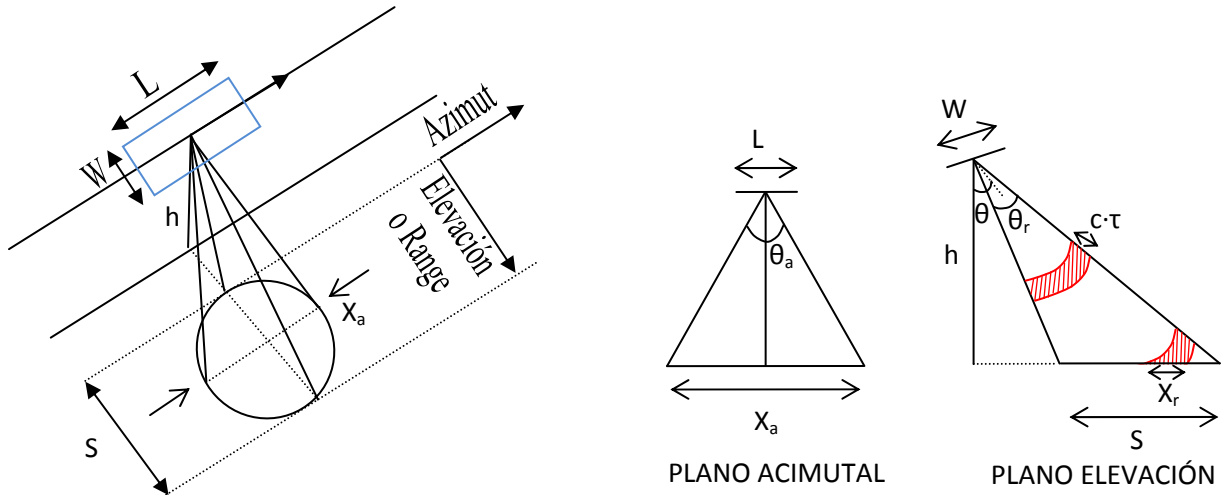


Fig. 1.8: esquema de coordenadas de la antena

$$X_a = \frac{h \cdot \theta_a}{\cos \theta} = \frac{h \cdot \lambda}{L \cdot \cos \theta} \quad (1.1)$$

La resolución en range se puede calcular según la siguiente expresión (para pulsos rectangulares):

$$X_r = \frac{c \cdot \tau}{2 \cdot \sin \theta} = \frac{c}{2 \cdot B \cdot \sin \theta} \quad (1.2)$$

Y la superficie visualizada por el radar (swath) como la siguiente expresión:

$$S = \frac{h \cdot \theta_r}{(\cos \theta)^2} = \frac{h \cdot \lambda}{W \cdot (\cos \theta)^2} \quad (1.3)$$

Estas ecuaciones son válidas antes de realizar ningún promediado como por ejemplo para reducir ruido speckle a costa de empeorar la resolución aumentándola. Normalmente una de las dimensiones, típicamente en range, tiene mejor resolución y es la que se pondera para obtener celdas de resolución cuadradas.

El funcionamiento descrito anteriormente es bajo el supuesto de que cada celda de resolución en acimut, o swath, es independiente de las celdas contiguas, como podría mostrarse en la figura 1.8 o en la figura 1.9. Este funcionamiento puede entenderse como si el radar se activara en instantes temporales fijados durante un tiempo suficiente como para observar el área correspondiente de terreno y posteriormente se desactivara hasta alcanzar el siguiente instante temporal.

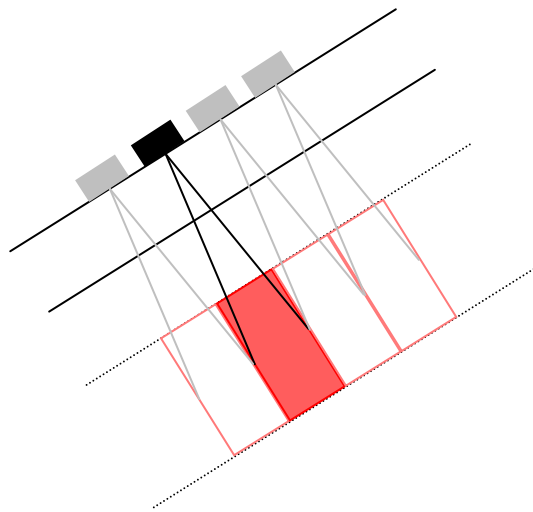


Fig. 1.9: Representación de RAR en movimiento

Sin embargo este funcionamiento discretizado no se corresponde con la realidad. En la práctica el radar visualiza el terreno de forma continua según se desplaza. Una representación más próxima a la realidad puede observarse en la figura 1.10.

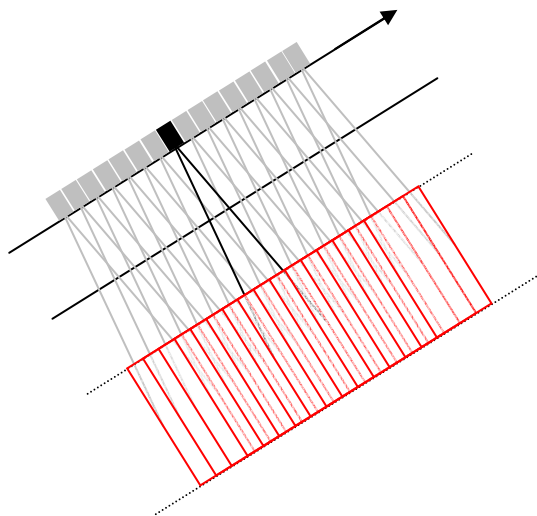


Fig. 1.10: Representación real del radar en movimiento



Como se puede observar en la figura 1.10 un blanco fijado es observado por el radar desde distintas posiciones, este hecho puede aprovecharse para mejorar la resolución en acimut siempre que el blanco permanezca dentro del área de visión del radar el tiempo suficiente. Este principio es equivalente al que se produce al realizar la integración de pulsos explicada al principio de la introducción en el apartado 1.1, ya que en este caso, aunque con algoritmos diferentes, también se realiza una integración temporal. A este funcionamiento se le conoce como Radar de Apertura Sintética (Synthetic Aperture Radar) o SAR ya que el resultado obtenido es equivalente al de disponer de una antena de longitud mayor en el eje de acimut.

### **1.4.2. Synthetic Aperture Radar**

Para describir el funcionamiento de SAR existen dos modelos, el de array sintético y el de síntesis Doppler (nota 4).

#### **1.4.2.1. Aproximación Array Sintético de SAR**

La aproximación de array sintético sigue principios similares a los empleados en la formación de un array real de tipo lineal, con la particularidad que en el caso de SAR el array se forma secuencialmente según el radar se desplaza y no de forma simultánea como ocurre con las antenas reales.

Para que la formación del array sintético sea correcta la velocidad del radar debe ser constante, de lo contrario las variaciones de fase provocadas podrían imposibilitar la formación de la apertura correctamente enfocada. En la figura 1.11 se puede ver una representación gráfica de la apertura sintética y su correspondiente equivalencia con una apertura real (figura 1.12).

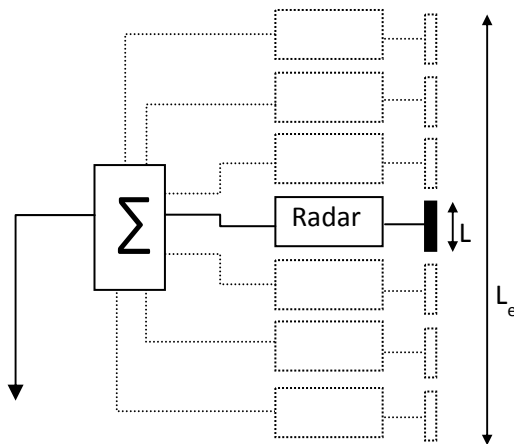


Fig. 1.11: Representación de la apertura sintética

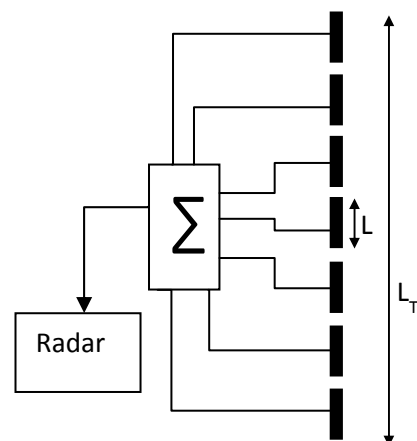


Fig. 1.12: Representación de la apertura real

Para el caso de apertura real el ancho de haz puede calcularse con la siguiente expresión:

$$\theta_a = \frac{\lambda}{L_T} \quad (1.4)$$

Mientras que para el caso de apertura sintética la expresión es la siguiente:

$$\theta_s = \frac{\lambda}{2 \cdot L_e} \quad (1.5)$$

El factor 2 dividiendo en la ecuación (1.5) es debido a que se corresponde con un modelo de propagación de doble sentido (2way) y es comparada con el modelo de único sentido (1way) de la ecuación (1.4).

De la ecuación (1.4) puede razonarse que para conseguir un ancho de haz suficientemente pequeño se requerirían valores de  $L_T$  del orden de kilómetros en el caso de satélites, cosa que con un array real sería inviable tanto en su fabricación como en su posterior puesta en órbita, mientras que para un array sintético es perfectamente asumible obtener dichos valores de  $L_e$ .

Para que las consideraciones anteriores sean correctas el valor de longitud efectiva de la apertura sintética ( $L_e$ ) debe cumplir 2 límites.

El primero es que el valor de  $L_e$  debe ser inferior a la anchura de la región iluminada por la antena real, pudiéndose expresar matemáticamente como:

$$L_e \leq R \cdot \theta_a = R \cdot \frac{\lambda}{L} \quad (1.6)$$

El segundo límite viene determinado por el campo lejano de onda de la apertura, por el cual la longitud de la apertura sintética queda restringida a valores en que el frente de fase se pueda considerar como una onda plana. Cuando se cumple esta restricción el SAR se conoce como enfocado (focused) y cuando no la cumple se denomina desenfocado (unfocused). La diferencia entre ambos modos radica en que para el SAR-focused la resolución en acimut no depende de la distancia al blanco mientras que en el caso de SAR-unfocused sí que depende.

En la siguiente figura se muestra la geometría de un sistema SAR-unfocused.

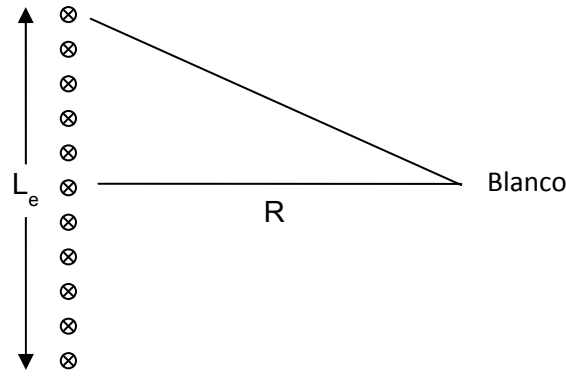


Fig. 1.13: Geometría de SAR-unfocused

En este caso la longitud efectiva  $L_e$  se puede calcular con la siguiente expresión:

$$L_e = \sqrt{R \cdot \lambda} \quad (1.7)$$

Y la resolución en acimut:

$$X_a = \frac{\sqrt{R \cdot \lambda}}{2} \quad (1.8)$$

Donde se puede observar la dependencia con la distancia al blanco.

Para conseguir que el SAR sea de tipo focused se puede aplicar una corrección en la fase al recibir la señal de cada elemento de la apertura sintética con el siguiente valor:

$$\Delta\Phi = \frac{2 \cdot \pi \cdot x^2}{\lambda \cdot R} \quad (1.9)$$

Donde  $x$  es la distancia desde el elemento que se pondera hasta el centro de la apertura sintética.

Tras realizar esta corrección las señales captadas por todos los elementos están en fase y el valor de la longitud efectiva se obtiene como:

$$L_e = R \cdot \frac{\lambda}{L} \quad (1.10)$$

Y la resolución en acimut:

$$X_a = R \cdot \theta_s = \frac{L}{2} \quad (1.11)$$

Cuyo valor es independiente de la distancia al blanco.

En la siguiente figura puede compararse la resolución para los casos de antena real, focused y unfocused SAR en función de la distancia al blanco.

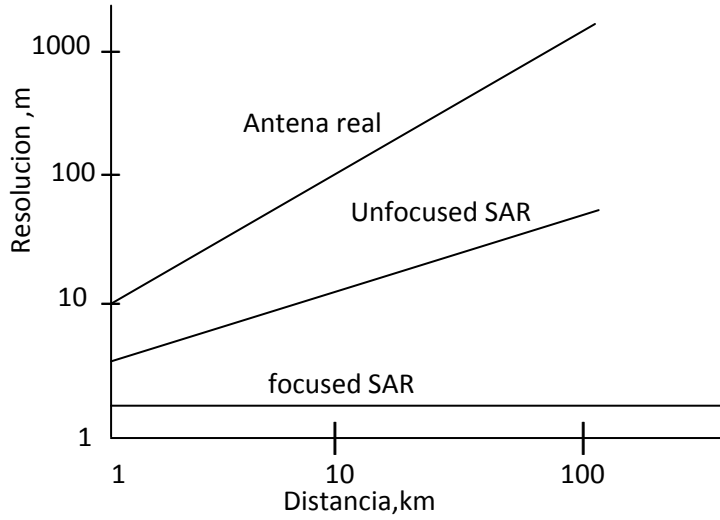
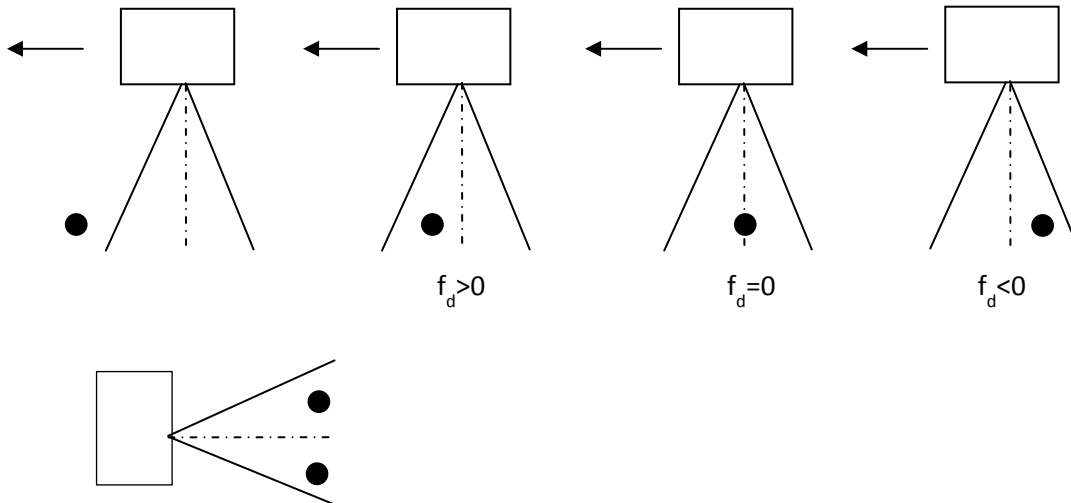


Fig. 1.14: Comparación del valor de resolución acimutal para los casos de antena real, focused-SAR y unfocused-SAR en función de la distancia al blanco [ref 1.5]

#### 1.4.2.2. Aproximación Doppler de SAR

La aproximación Doppler trata de identificar los blancos según el valor de frecuencia Doppler del eco producido por el movimiento del radar, tal como se muestra en las siguientes representaciones.



De este modo es posible discriminar los dos blancos a partir del valor de frecuencia Doppler que producen sus ecos.

El espectro frecuencial cubrirá el margen comprendido entre  $f_0 - f_d$  y  $f_0 + f_d$ , siendo

$$f_d = -\frac{2 \cdot f_0}{c} \cdot v_r = -\frac{2}{\lambda} \cdot v_r$$

Siendo  $B_d=2\cdot f_d$  la anchura espectral de la señal el mínimo tiempo medible es  $t_m = \frac{1}{B_d} = \frac{L}{2\cdot v_r}$ , lo que proporciona una resolución acimutal igual a:

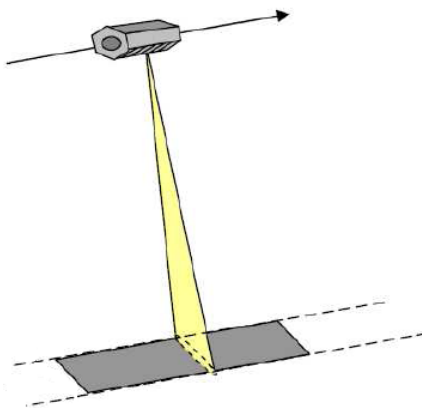
$$x_a = v_r \cdot t_m = \frac{L}{2} \quad (1.12)$$

El ancho de banda Doppler también determina el valor de PRF de tal forma que  $PRF > 2\cdot f_d$ .

## **1.5. StripMAP vs ScanSAR**

### **1.5.1. StripMAP**

La descripción realizada anteriormente del funcionamiento del SAR en que el radar analiza el terreno conforme se desplaza sin realizar ninguna variación del ángulo de incidencia del haz de antena se conoce comercialmente como modo de exploración StripMAP. En la figura 1.15 puede observarse una representación de dicho modo de exploración empleado por TerraSAR-X



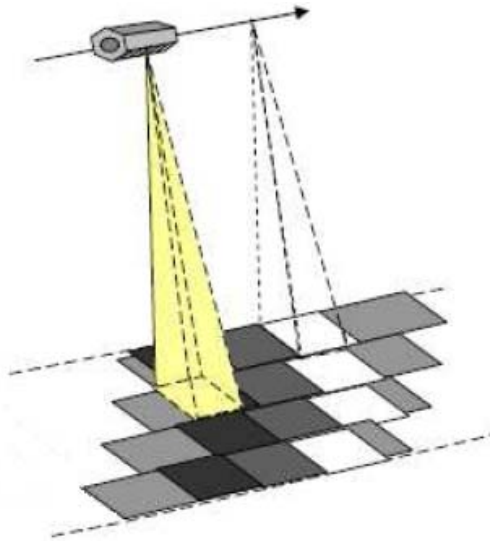
*Fig. 1.15: modo de exploración stripmap de Terrasar-X*

Este es el modo de exploración más convencional y tiene la ventaja que todos los puntos de la escena son tratados con el máximo de ganancia que proporciona la antena. La resolución con que se obtienen las imágenes en este modo está alrededor de los 5 metros. Sin embargo existen diversas aplicaciones que pueden ser operativas con resoluciones más altas, lo que conlleva que el número de pulsos necesarios para asumir tal resolución sea inferior. Ante esta situación existen 2 posibilidades. Una primera opción sería desconectar el radar cuando ya no sea necesario obtener más pulsos de una escena, ahorrando así energía. La segunda opción consiste en variar el ángulo de incidencia en elevación para aumentar la

cobertura del radar a costa de una reducción del tiempo de apertura y, por lo tanto, una pérdida en la resolución respecto a StripMAP.

### **1.5.2. ScanSAR**

Esta segunda opción se conoce como modo ScanSAR y se basa en un barrido que la antena realiza en el ángulo de elevación, que puede observarse en la figura 1.16.



*Fig. 1.16: modo de exploración ScanSAR de Terrasar-X*

El modo ScanSAR sufre un empeoramiento de la resolución acimutal ya que el haz de antena solo visualiza un área específica durante un tiempo  $t_1$ , menor al necesario para formar una apertura sintética completa. En este caso la longitud efectiva de la apertura sintética tiene el siguiente valor:

$$L_e = v \cdot t_1 \quad (1.13)$$

Y por tanto la resolución acimutal tiene la siguiente expresión:

$$X_a = \frac{\lambda \cdot h}{v \cdot t_1 \cdot \cos\theta} \quad (1.14)$$

Además este modo sufre de un efecto radiométrico conocido como scalloping que se tratará en las siguientes secciones y que es el objeto principal de análisis en este proyecto.

Existe otro modo de exploración denominado TopSAR que está diseñado para combatir el scalloping existente en el modo ScanSAR consiguiendo la misma resolución en acimut. Dicho modo será descrito y evaluado en el capítulo 3.

### **1.6. La misión Paz**

Tal como se describe en las referencias [1.8] y [1.9], Paz se enmarca dentro del Programa Nacional de Observación de la Tierra por Satélite (PNOTS) del gobierno español, para el desarrollo del cual el Ministro de Defensa, el Ministro de Industria, Turismo y Comercio el 26 de julio de 2007 dotaron al programa de una inversión de 346 millones (135 millones correspondientes a MINISDEF y 211 millones a MITYC). El programa incluye dos satélites:

Ingenio: con sensores ópticos, gestionado por Centro para el Desarrollo Tecnológico e Industrial (CDTI), orientado a aplicaciones civiles. Sus prestaciones son realización de unas 100 imágenes diarias de la Tierra, de entre 2,5 y 10 metros de resolución, medirá tres metros de largo y uno de base, pesará 300 kilogramos, orbitará entre 500 y 700 kilómetros de altura y tendrá un coste de 190 millones de euros

Paz: sensor radar SAR, será gestionado por el Ministerio de Defensa, sus aplicaciones están orientadas tanto a civil como militar, pudiendo obtener imágenes de la Tierra de alta resolución en condiciones climáticas adversas y durante la noche. Se prevé su lanzamiento para 2012. Sus capacidades son de realización de 64 imágenes diarias con un metro de resolución, peso de unos 1.100 kilogramos, dimensiones de 5 metros de largo por 1 de base, orbita entre 500 y 700 km de altura, y tendrá un coste de 135 millones de euros.

En 2008 HISDESAT fue elegido como contratista y operador del proyecto con financiación del Ministerio de Defensa, el cual obtendrá como contraprestación una media de 32 imágenes diarias. Por su parte HISDESAT contrato a EADS en 2008 para el desarrollo del satélite SAR. En 2009 INTA inició la contratación del Segmento Terreno Común, que tendrá que estar listo antes del lanzamiento de los satélites.

El Segmento de Vuelo (satélite) está siendo desarrollado e implementado por EADS-CASA Espacio en España a partir del diseño con variaciones del satélite TerraSAR-X desarrollado por EADS Astrium GmbH para el DLR.

El Sistema completo (Ingenio y Paz) se prevé que este operativo (Segmento de Vuelo y Segmento Terreno Común) durante el año 2013 y se estima que su vida útil sea de 5 años, pudiéndose alargar a 7 o 8, en función de la deriva de sus prestaciones.

Para el Gobierno este proyecto supone disponer de un instrumento propio de primer nivel tecnológico con aplicación en multitud de ámbitos (seguridad y defensa, control de riesgos, gestión medioambiental y de recursos,...) y situará a la industria nacional

en una posición de vanguardia en el ámbito de los programas espaciales europeos, siendo ésta la primera vez que se integran en España satélites de esta dimensión.

Las aplicaciones del programa permitirán el uso del satélite SAR en campos tan diversos como la vigilancia de la superficie terrestre, control de vertidos marítimos, urbanismo y ordenación del territorio, control de la ocupación del suelo o de los recursos naturales, planificación de infraestructuras, evaluación de catástrofes, incendios forestales, control del medio ambiente, así como inteligencia, simulación de operaciones militares, verificación de tratados internacionales, control fronterizo o cartografía de alta resolución.

Como referencia gráfica se incluye una imagen artística del satélite TerraSAR-X con detalles de sus componentes principales y una imagen de París tomada para una aplicación de interferometría. En el anexo 1 se describe dicho satélite con mayor detalle, además de describir otras misiones que emplean radares SAR.

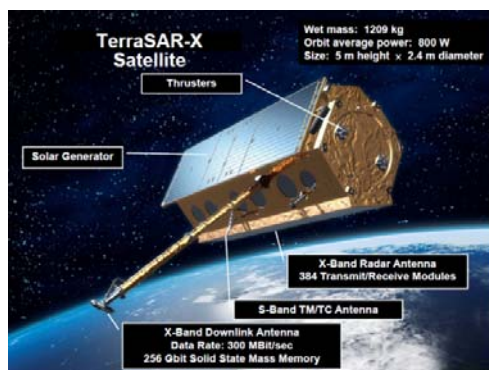


Fig. 1.17: satélite TerraSAR-X

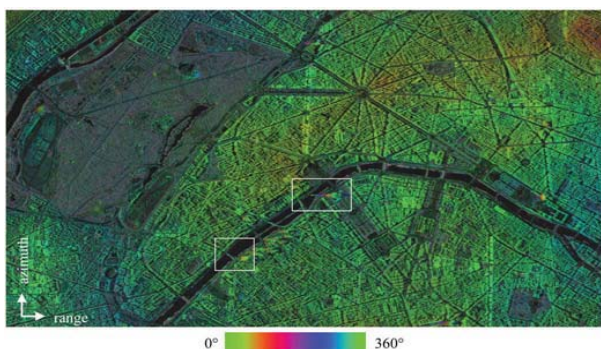


Fig. 1.18: imagen interferométrica de París tomada con TerraSAR-X

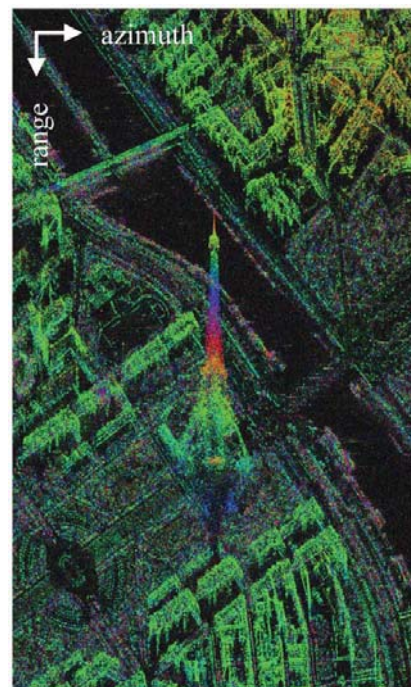


Fig. 1. 19: zoom de fig 1.18



## **1.7. Referencias y Notas**

### **Notas**

- Nota 1: para más información consultar referencia [1.4] o la referencia [1.5], especialmente el capítulo 14: Other Radar Topics.
- Nota 2: consultar libros de antenas como por ejemplo aconsejado en la referencia [1.6], en especial el capítulo 6 apartado 4.
- Nota 3: consultar libros de antenas como por ejemplo aconsejado en la referencia [1.6], en especial el capítulo 5, o la referencia [1.7].
- Nota 4: descripción basada en el material docente referenciado en [1.10]. Si se desea más información acerca de procesamiento de sistemas radar SAR consulte las referencias [1.11] y [1.12].

### **Referencias**

- [1.1]: "The TerraSAR-X Antenna System"; Bernhard Grafmüller, Alexander Herschlein, Christian Fischer; EADS-Astrium GmbH
- [1.2]: "The TerraSAR-X active phased array antenna"; M. Stangl, R. Werninghaus, R. Zahn
- [1.3]: DLR webpage: (<http://www.dlr.de/en/>)
- TerraSAR-X web ([www.dlr.de/eo/en/desktopdefault.aspx/tabid-5725/9296\\_read-15979](http://www.dlr.de/eo/en/desktopdefault.aspx/tabid-5725/9296_read-15979))
- [1.4]: "Introduction to airborne radar"; George W. Stimson; SciTech Publishing, Inc.
- [1.5]: "Introduction to radar systems"; Merrill I. Skolnik; McGraw-Hill Book Company
- [1.6]: "Antenas"; Ángel Cardama Aznar, Lluís Jofre Roca; Ed. UPC
- [1.7]: "Finite Antenna Arrays and FSS"; Ben A. Munk
- [1.8]: ASR webpage (<http://www.intelpage.info/inteligencia-militar.html>)
- [1.9]: Ministerio de Defensa de España (<http://www.mde.es/> )
- [1.10]: Material docente Teledetección, asignatura optativa de Ingeniería de Telecomunicaciones, plan 1992, ETSETB (UPC)

[http://upcommons.upc.edu/ocw/gestor/index.php?propia=yes&id\\_assig=230-8-11680&idcentre=230&idtit=8](http://upcommons.upc.edu/ocw/gestor/index.php?propia=yes&id_assig=230-8-11680&idcentre=230&idtit=8)

[1.11]: “Understanding Synthetic Aperture Radar Images”; Chris Oliver, Shaun Quegan; Artech House Remote Sensing Library

[1.12]: “Processing of Synthetic Aperture Radar (SAR) Images”; Henri Maitre; Wiley-ISTE

### **Bibliografía Recomendada No referenciada**

[1.13]: “Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB”; Bassem R. Mahafza

[1.14]: “Radar Signals”; Nadav Levanon, Eli Mozeson

[1.15]: “Synthetic Aperture Radar Signal Processing with Matlab Algorithms”; Mehrdad Soumekh

[1.16]: “Remote Sensing with Imaging Radar”; John A. Richards; Ed. Springer

[1.17]: Terrasar-x Mission brochure

[http://www.dlr.de/eo/en/Portaldata/64/Resources/dokumente/TSX\\_brosch.pdf](http://www.dlr.de/eo/en/Portaldata/64/Resources/dokumente/TSX_brosch.pdf)

### **1.8. Variaciones de nomenclatura**

Es posible que al revisar el escrito de este proyecto los lectores encuentren variaciones en la nomenclatura respecto a otras publicaciones. Por ello la siguiente tabla trata de recoger las posibles variaciones encontradas conjuntamente con una breve explicación de estas.

Empleada en esta memoria	Variaciones	Explicación
$X_a$	$\Delta z$	Resolución del radar en el eje acimut, o paralelo a la línea de vuelo
$X_r$	$\Delta R_g$	Resolución del radar en el eje de elevación o range proyectada sobre el terreno terrestre
	$\Delta R$	Resolución en distancia o range en la línea perpendicular al radar. Su ecuación es: $\Delta R = \Delta R_g \cdot \sin(\theta) = \frac{c}{2 \cdot B}$
$L_e$	$L_s$	Longitud efectiva de la apertura sintética de SAR
$\theta_a$	$\theta_L ; \theta_H ; \theta_B$	Ancho de haz en acimut de la antena real
$L;D$	$l;D$	Longitud de la antena real en el eje de acimut
$L_T$	$L$	Longitud total del array real de antenas
$\theta_s$	$\theta_{Ls}$	Ancho de haz en acimut de la apertura sintética
$f_d$		Frecuencia Doppler de una señal

## **Capítulo 2**

# **Análisis del error de scalloping en el modo ScanSAR**

## **2.1. Introducción**

El scalloping es una fluctuación periódica de la sensibilidad radiométrica de la imagen en uno de sus ejes, formando unas bandas más claras y oscuras que dificultan la interpretación cualitativa y cuantitativa de las imágenes SAR. Es conveniente aclarar que si se revisan publicaciones que tratan temas relacionados con radiometría de imágenes SAR pueden observarse que se nombran dos tipos de scalloping.

El primero de ellos es el tratado en este proyecto. En este caso es debido a la forma del diagrama de radiación de la antena y a la dependencia de la ganancia con el ángulo de incidencia de la señal en acimut, por lo que también puede verse con el nombre de acimut scalloping en dichas publicaciones.

El segundo es conocido como range scalloping, el cual es un efecto secundario del uso del algoritmo SPECAN y se debe a la colocación de los bloques de DFT, a la organización de los datos adquiridos y a errores en la estimación del Doppler centroid (nota 1).

Ambos se producen en los modos de exploración a ráfagas como ScanSAR.

En los posteriores capítulos se describirá el efecto conocido como acimut scalloping, en adelante denominado únicamente como scalloping por sencillez, y la aplicación diseñada bajo la plataforma Matlab para estimar su valor en los satélites Radarsat, Envisat y Paz, centrándose los resultados en este último y sirviendo los otros dos como comparación o para realizar la descripción de conceptos con el objetivo de que queden lo más claros posibles.

## **2.2. Descripción teórica del scalloping**

### **2.2.1. Introducción a ScanSAR**

Como se ha detallado en las secciones precedentes el modo de exploración ScanSAR consiste en realizar una conmutación del ángulo de incidencia en la dirección de elevación tras un cierto tiempo, este tiempo es conocido como tiempo de ráfaga. Este proceso produce que el terreno sea vislumbrado por el radar como si este estuviera particionado. Cada una de estas particiones se denominará en adelante swath, aunque en algunas publicaciones también se le denomina como notch, beam o ráfaga, y el número de éstos se corresponde con el número de conmutaciones de ángulo en

elevación. Es común que estos 4 conceptos se utilicen de forma indistinta aunque su significado sea distinto, siendo el más correcto de ellos el de swath.

En la figura 2.1 puede observarse una representación para el caso de 3 swaths.

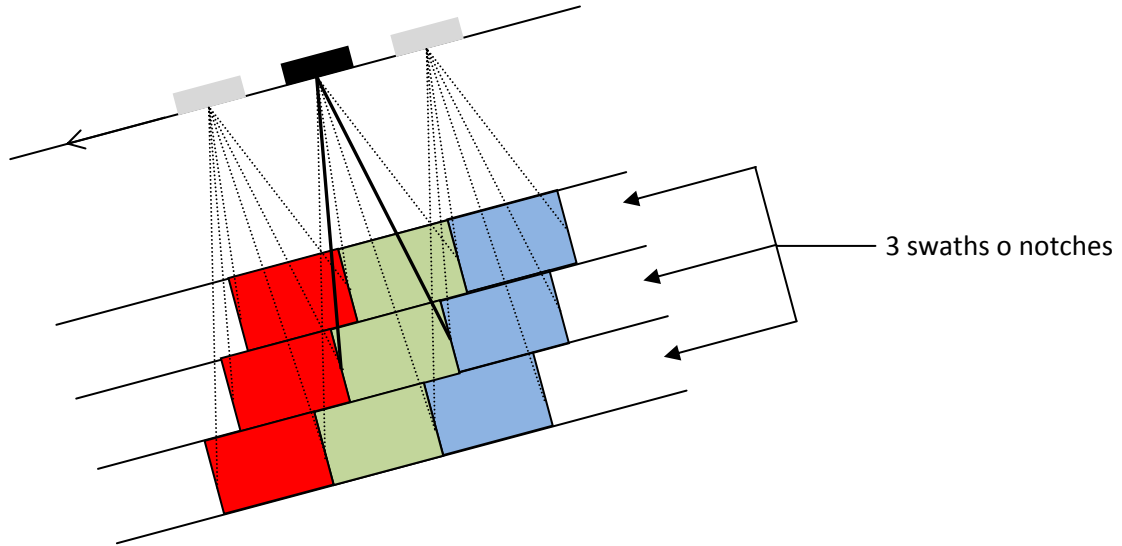


Fig. 2.1: ScanSAR de 3 swaths

El tiempo en que el radar permanece visualizando cada swath se conoce como tiempo de ráfaga, durante el cual se transmite el grupo de pulsos de iluminación. El número de pulsos transmitidos durante dicho tiempo se puede calcular como el producto entre el tiempo de ráfaga ( $\tau_f$ ) y la PRF.

Estos pulsos idealmente deberían ser tratados con la misma ganancia, sin embargo debido al diseño físico de las antenas esto no es así ya que la antena tiene un diagrama de radiación similar a una sinc. En la figura 2.2 se pueden observar ejemplos de los diagramas de radiación para los 3 satélites disponibles en la aplicación.

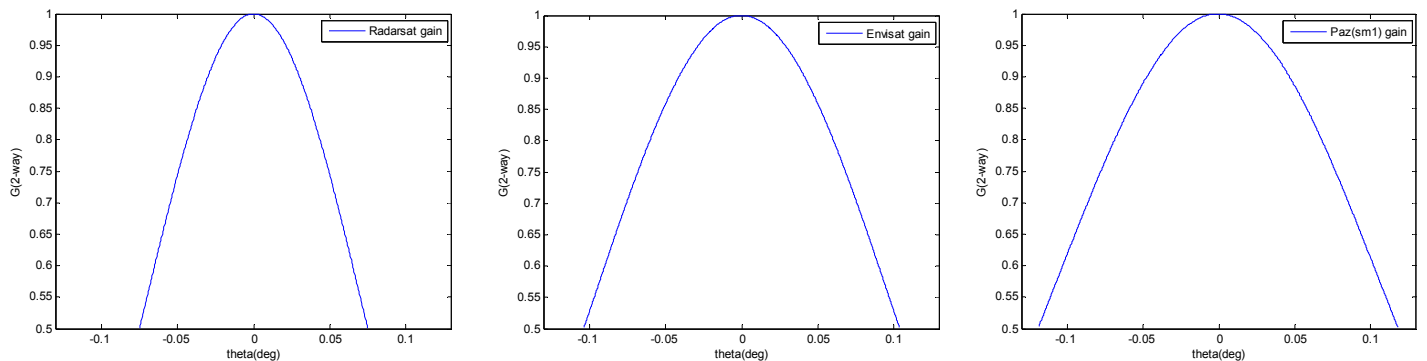


Fig. 2.2: diagramas de radiación para Radarsat, Envisat y Paz (beam sm1)

Además, la representación de la figura 2.1 es un caso ideal en que los swaths no sufren solapamiento y los puntos del terreno sólo son visualizados una vez. Sin embargo en la práctica no es así. Una representación más realista puede observarse en la figura 2.3.

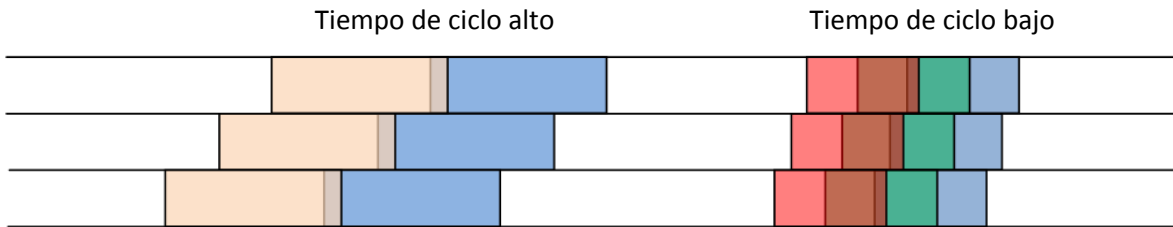


Fig. 2.3: representación realística de ScanSAR de 3 swaths

La diferencia entre ambas situaciones representadas en la figura 2.3 radica en el tiempo de ciclo ( $T_c$ ), que corresponde con la suma de los tiempos de ráfaga de los swaths disponibles, en este caso 3.

Puede apreciarse en la figura 2.3 que existe la posibilidad de que un punto fijado sea vislumbrado por el radar diversas veces. Si se fija un swath puede representarse esta situación en la figura 2.4, en la cual se añade el hecho de que el punto no sea transmitido y recibido por el máximo del diagrama de ganancia. En la figura 2.4 se ejemplifica este hecho en dos puntos señalados con x y sus visualizaciones en puntos verdes.

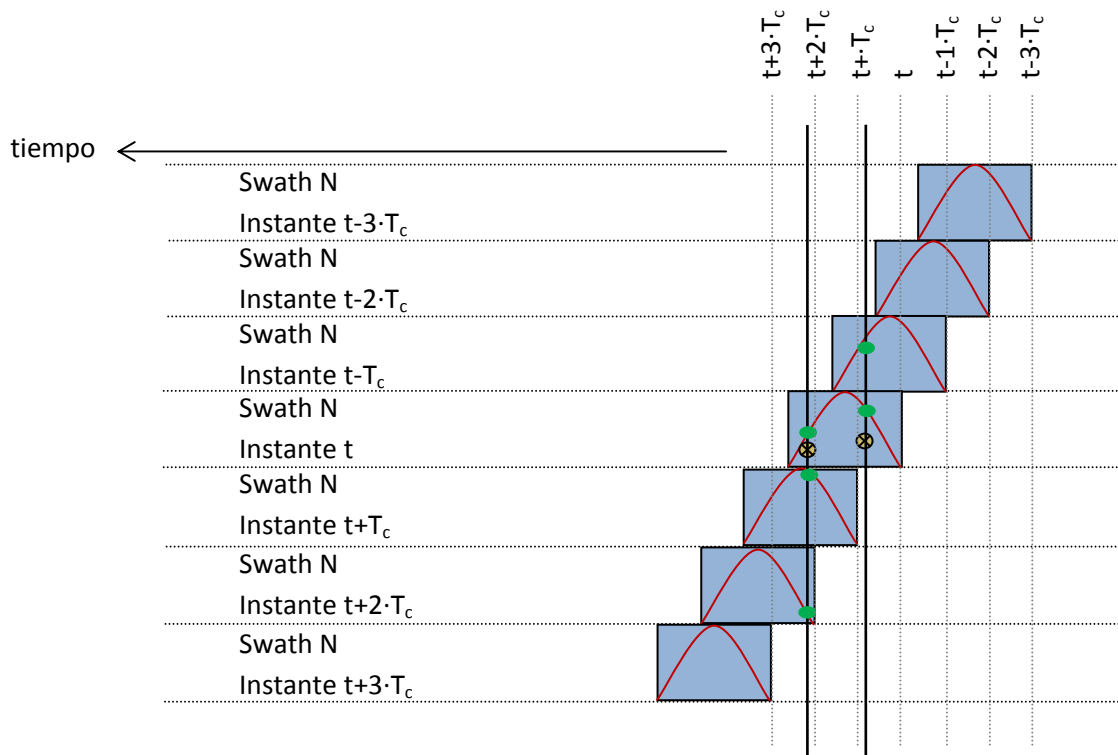
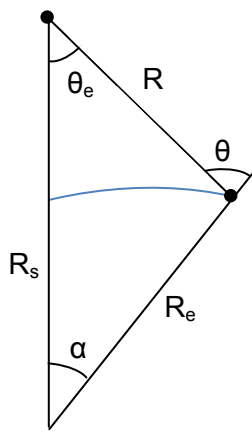


Fig. 2.4: visualización de dos puntos en un swath fijado

Un parámetro que se puede extraer de la figura 2.4 es el número de visualizaciones en acimut o número de ráfagas procesadas para un punto dado. Este parámetro en adelante será nombrado  $L_{az}$  y puede obtenerse de forma sencilla dividiendo la duración temporal equivalente del diagrama de radiación y el tiempo de ciclo.

$$L_{az} = \frac{\Delta t}{T_c} \quad (2.1)$$

Para obtener la duración temporal del diagrama de radiación se debe obtener el ancho de haz a -6dB, por ser diagrama de doble sentido, y transformarlo a tiempo con el siguiente conjunto de ecuaciones (ref. [2.3]):



$$\Delta\Phi = \frac{\Delta t}{R} \cdot V_b \quad (2.2)$$

$$V_b = V_{sc} \cdot \frac{R_e}{R_s} \cdot \cos(\alpha) \quad (2.3)$$

$$\alpha = \theta - \theta_e \quad (2.4)$$

$$\frac{\sin(\theta)}{R_s} = \frac{\sin(\theta_e)}{R_e} = \frac{\sin(\alpha)}{R} \quad (2.5)$$

$$R^2 = R_s^2 + R_e^2 - 2 \cdot R_s \cdot R_e \cdot \cos(\alpha) \quad (2.6)$$

Fig. 2.5: geometría radar/blanco

Variable	Definición
$R_e$	Radio de la Tierra
$V_b$	Velocidad del blanco
$V_{sc}$	Velocidad del radar
$R$	Distancia del radar al blanco
$\theta_e$	Ángulo de incidencia del radar
$R_s$	Distancia del centro de la Tierra al radar

Tabla 2.1: descripción de parámetros de geometría

Las variables conocidas a priori típicamente son  $R_e$ ,  $V_{sc}$ ,  $\theta_e$  y  $R_s$ , por lo que la secuencia de pasos para realizar los cálculos necesarios se puede mostrar en la fig. 2.6

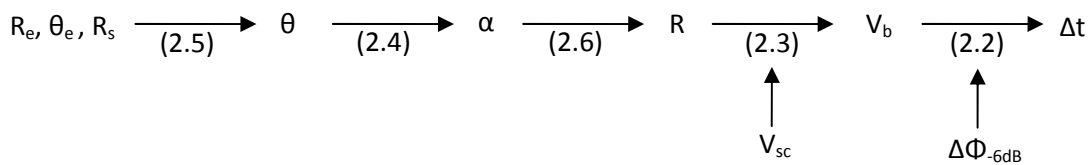


Fig. 2.6: secuencia de ecuaciones para obtener  $\Delta t$



### 2.2.2. Parámetros numéricos de scalloping

Una vez obtenidos los valores del tiempo de ciclo,  $T_c$ , y la velocidad del blanco,  $V_b$ , se puede obtener la distancia entre líneas de scalloping,  $\Delta x$ , con la siguiente ecuación:

$$\Delta x = V_b \cdot T_c \quad (2.7)$$

Para finalizar queda calcular la potencia de scalloping para distintos errores de estimación del Doppler centroid y la profundidad de potencia de scalloping.

En la ecuación (2.8) se representa en forma de sumatorio el cálculo de potencia:

$$P = \sum_{l=1}^{L_{az}} \sum_{j=j_0}^N G_{ant}^2(\phi_j - \phi_0) W_L(\phi_j) W_S(j) P_t(j) \quad (2.8)$$

Donde  $\phi_0$  es el desplazamiento del diagrama de radiación debido al error de estimación del Doppler centroid,  $P_t$  es la potencia transmitida,  $W_S$  la ventana de transmisión empleada y  $W_L$  la ponderación seleccionada.

La ponderación se puede elegir entre los métodos rectangular,  $W_L = 1$ , inverso de ganancia en acimut,  $W_L = \frac{1}{G^2}$  y Bamler (ref. [2.4]) para los satélites Radarsat y Envisat. Sin embargo en el caso de Paz el método de Bamler no se puede aplicar ya que el valor de  $L_{az}$  empleado es 1 y este método no está definido para dicho valor.

La fórmula (2.8) puede entenderse de forma más sencilla con la siguiente figura que representa la visualización del punto situado a un ángulo de  $0^\circ$  en acimut para el satélite Radarsat. La potencia de scalloping obtenida con la ecuación sería la integración (suma) de la parte en línea roja continua de la figura 2.8.

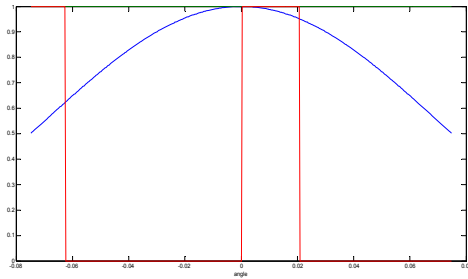


Fig. 2.7: diagrama de radiación y pulsos

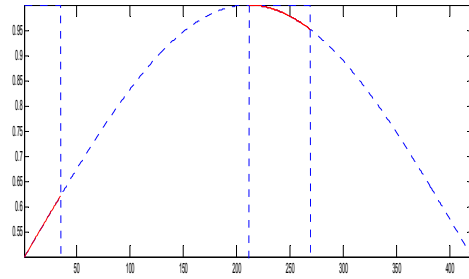


Fig. 2.8: señal recibida visualizando el punto a  $0^\circ$

Repitiendo el cálculo de la ecuación (2.8) para distintos puntos se obtendría un perfil de scalloping como el mostrado en la siguiente imagen, el cual esta normalizado.

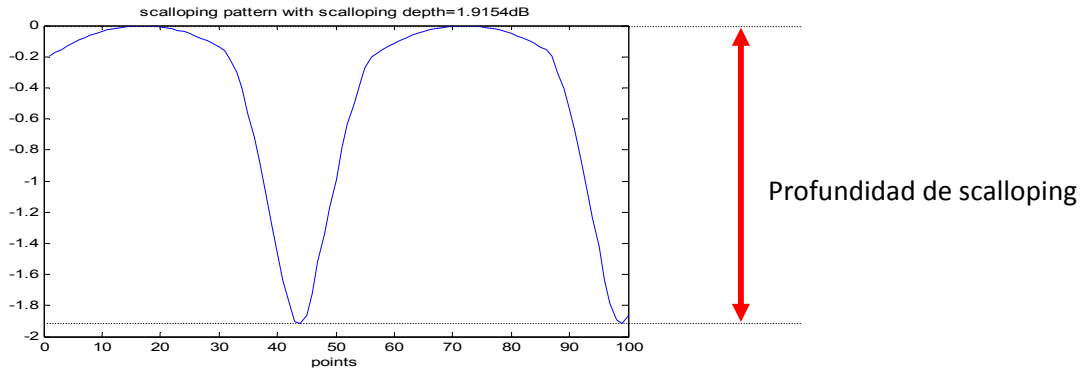


Fig. 2.9: perfil de scalloping, Radarsat, 100 puntos y error de doppler centroid de 100 Hz

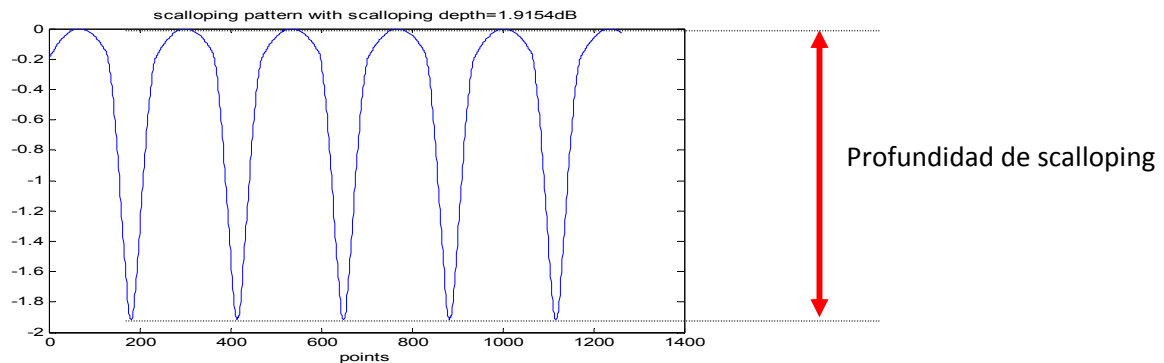


Fig. 2.10: perfil de scalloping, Radarsat, all points (1263 puntos o 3 vueltas) y error de doppler centroid de 100 Hz

A partir del perfil de scalloping normalizado se puede calcular la profundidad de scalloping calculando su valor máximo como se representa en la figura 2.10.

Como último paso se puede calcular la profundidad de scalloping para distintos errores de Doppler centroid repitiendo iterativamente el cálculo anterior. En la figura 2 se pueden observar los valores de profundidad de scalloping para errores entre -150 y 150 Hz para el satélite Radarsat.

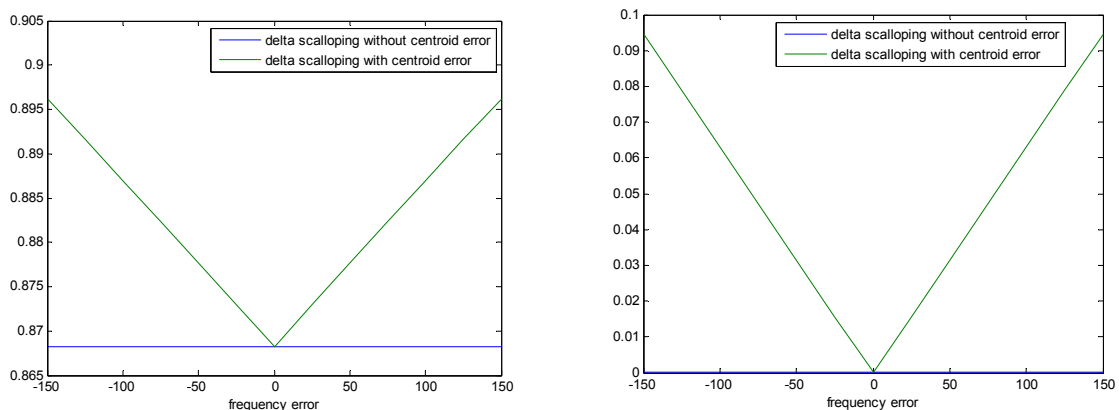


Fig. 2.11: profundidad de scalloping, Radarsat, ponderación rectangular (a) e inversa de diagrama en azimuth (b)

En la posterior sección se detallará el proceso seguido por la aplicación BUMSA para realizar estos cálculos centrándose en el satélite Paz.

## 2.3. Cálculo del scalloping en Paz con BUMSA

### 2.3.1. Introducción

Para realizar las simulaciones y los cálculos que se detallarán en esta sección se ha desarrollado una interfaz gráfica que se puede observar en la figura 2.12. El funcionamiento de dicha aplicación se detalla en el manual de usuario incluido en el capítulo 7.

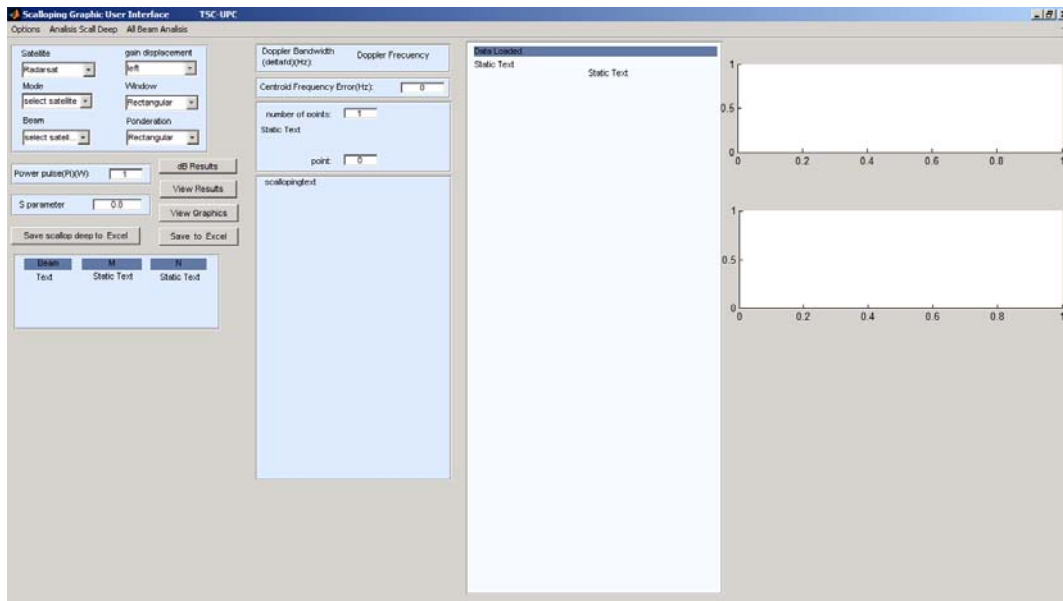


Fig. 2.12: aplicación BUMSA(BURst Modes Scalloping Analyzer)

Esta aplicación obtiene de unos ficheros toda la información relacionada con los tres satélites cargándola según se seleccionen las opciones correspondientes. Por ejemplo, al seleccionar un beam de Paz la aplicación cargará su correspondiente diagrama de radiación proporcionado mediante un fichero de texto.

Para mostrar los ejemplos gráficos en cada paso se ha optado por seleccionar el satélite *Paz*, modo de exploración *SC2*, el beam *SM3* y una ventana de *Kaiser*. Para calcular la profundidad de scalloping se ha optado por analizar con la opción 'all point' y un margen de errores entre -150 y 150 Hz separados cada 25 Hz. La opción 'all points' se activa escribiendo *all* en el menú de número de puntos y realiza diversas rotaciones del tren de pulsos.

Como se ha dicho anteriormente Paz no admite el método de Bamler como ponderación ya que se emplea un valor de  $L_{az}$  igual a 1. Sin embargo para los primeros beams el valor real de  $L_{az}$  es un poco superior a 1, en cuyo caso se selecciona de las dos partes del diagrama visualizado la que proporcione una mayor potencia.

Una vez seleccionados los parámetros satélite, modo y beam se debe elegir la ponderación deseada, lo que además iniciará todos los cálculos para calcular el scalloping en los puntos seleccionados. El resto de opciones, como el cálculo de profundidad de scalloping, se basan en realizar llamadas a esta función. En la próxima sección se describe el funcionamiento de esta función como un conjunto de pasos

### 2.3.2. Pasos para la simulación y el cálculo de scalloping

El primer paso es calcular los valores de  $R_b$ , distancia entre el radar y el blanco, y  $V_b$ , velocidad del blanco mediante el conjunto de ecuaciones (2.2) a (2.6).

El segundo cargar o calcular el diagrama de radiación. Para ello se crea una base de tiempos en que la resolución es  $\frac{1}{PRF}$ . Con esta base temporal y la ecuación

$$resolucion\_angular = rad2deg(resolucion\_temporal * \frac{V_b}{R}) \quad (2.9)$$

Se crea una base angular. En el caso de Paz se carga el fichero correspondiente con el diagrama de ganancia y se acota dicho diagrama al margen a -3dB (o -6dB en 2-way). Después se interpola el diagrama para que esté definido en la base angular creada anteriormente y se calcula el diagrama de radiación afectado por el error de estimación de Doppler centroid. El error de Doppler centroid se define en Hz y la base angular está definida en grados, por lo que se emplea la siguiente ecuación:

$$\Delta f_{Dop} = 2 \cdot \frac{V_{sc}}{\lambda} \cdot \Delta \xi \cdot (1 - \frac{T}{T_e} \cdot \cos \psi) \quad (2.10)$$

Despejando  $\Delta \xi$ , el desplazamiento angular que provoca  $f_{DOP}$ , cuyo resultado es en radianes:

$$\Delta \xi = \frac{\Delta f_{Dop} \cdot \lambda}{2 \cdot V_{sc} \cdot (1 - \frac{T}{T_e} \cdot \cos \psi)} \quad (2.11)$$

En la siguiente tabla se muestran los valores obtenidos para el satélite Paz:

Variable	Descripción	Valor
$\Delta f_{Dop}$	Error de Doppler centroid	(seleccionable) 100 Hz
$\Delta \xi$	Error en grados o radianes	(seleccionable) 0.0114 deg
$V_{sc}$	Velocidad del radar	7,69 Km/s
$\lambda$	Longitud de onda	0,031 m
$T$	Periodo de rotación del satélite	94,84 min
$T_e$	Periodo de rotación de la Tierra	1440 min
$\psi$	Inclinación de la órbita	98,3 deg

Tabla 2.2: valores de las variables para el cálculo del error de centroid para Paz

En la siguiente figura se muestra el diagrama de radiación del beam SM3 con un error de +100 Hz y de -100 Hz.

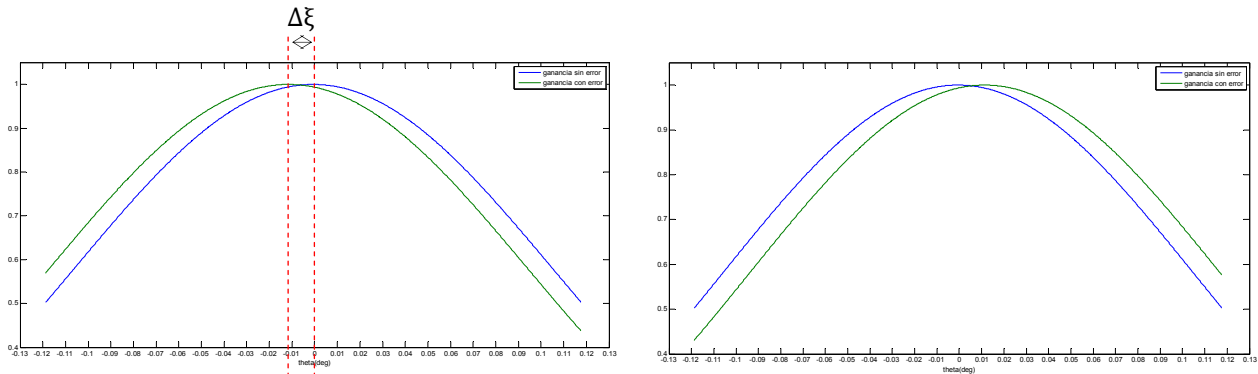


Fig. 2.13: diagrama de ganancia del beam SM3 sin error (azul), con error (verde) de -100Hz (a) y +100Hz (b)

El siguiente paso es calcular el tiempo de ciclo de cada modo y la distancia entre líneas de scalloping. Los resultados obtenidos pueden observarse en la siguiente tabla:

Modo de exploración	Tiempo de ciclo(ms)	Distancia de scalloping (km)	
		Máximo	Mínimo
SC1	243.193	1.732	1.730
SC2	252.100	1.796	1.794
SC3	274.898	1.958	1.956
SC4	302.308	2.154	2.151
SC5	333.498	2.376	2.373
SC6	367.728	2.620	2.616
SC7	403.586	2.875	2.872

Tabla 2.3: resultados para el tiempo de ciclo y la distancia de scalloping

El siguiente paso es crear el tren de pulsos de valor 1 que seleccionará la parte del diagrama de ganancia con que es visualizado el punto por parte de la antena. Aunque sólo sea necesario crear un tren de  $L_{az}$  pulsos, para reducir la complejidad a la hora de desplazar los pulsos se crea un tren con un número mayor de pulsos, en este caso 6 veces mayor. La distancia entre cada pulso se corresponde con el tiempo de ciclo, incluyendo el caso del último pulso hasta el final del tren, como puede observarse en la figura 2.14. El final del tren de pulsos es importante que incluya el tiempo de ciclo porque así el desplazamiento se puede realizar con una función de desplazamiento circular implementada en Matlab. La duración de cada pulso en tiempo corresponde con el valor  $\tau_j$  obtenido de las especificaciones y en muestras corresponde con el valor del producto  $\tau_j \cdot PRF$ .

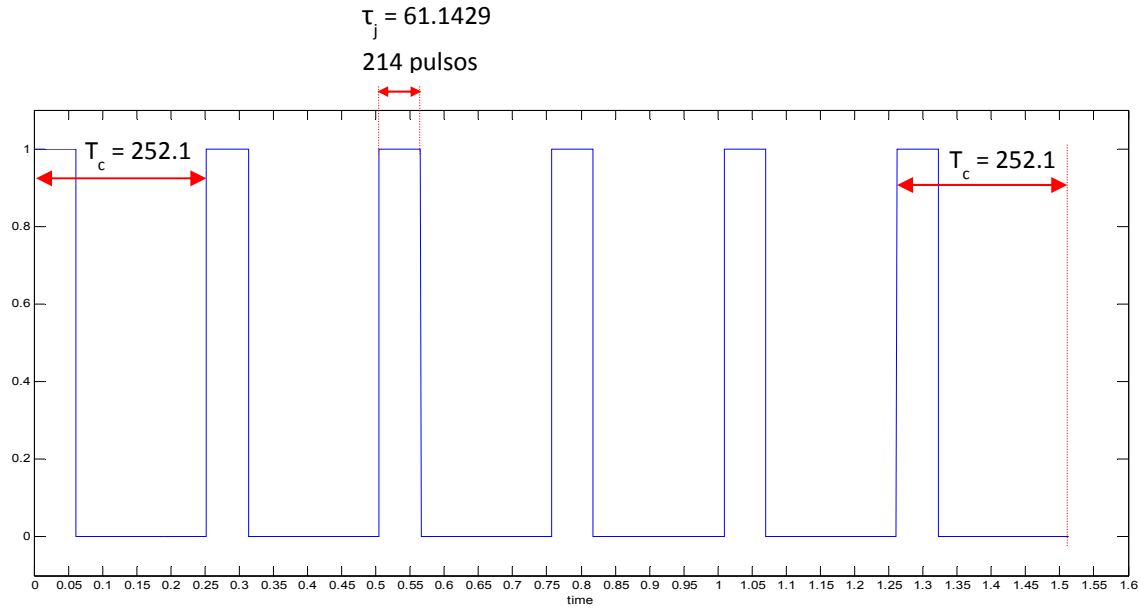


Fig. 2.14: tren de pulsos (tiempos en milisegundos) con PRF=3500 pulsos/seg

El siguiente paso es el cálculo de la ponderación. Para el caso de Paz sólo se emplean la ponderación rectangular y la ponderación inversa de ganancia en acimut.

En la figura 2.15 se muestran ambas ponderaciones para el beam SM3

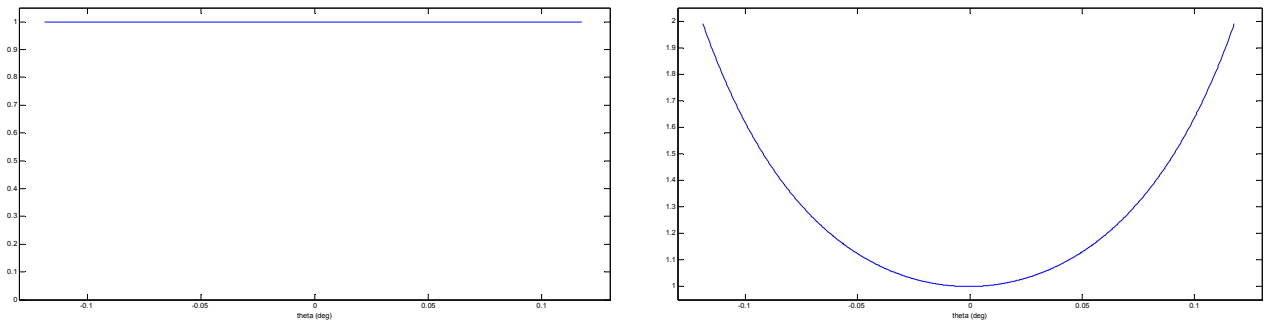


Fig. 2.15: ponderación rectangular (a) e inversa de azimut (b) para el beam SM3

El siguiente paso consiste en realizar los cálculos de potencia de scalloping. Si en la aplicación se selecciona únicamente 1 punto se realiza el cálculo para el punto especificado en el campo *point* en grados, sin embargo si se selecciona un número mayor que uno, por ejemplo 1000, la aplicación seleccionara el número de puntos dentro del margen angular a -3dB(1-way) del diagrama de ganancia.

Posteriormente, por cada punto se desplazará el tren de pulsos para hacerlo corresponder con el punto deseado y se solapará el tren de pulsos con el diagrama de ganancia, en este caso sin error, como se puede observar en la figura 2.16. Este

último proceso es posible pese a que el diagrama de ganancia está definido en grados y el tren de pulsos en tiempo gracias a la relación entre las bases temporal y angular que se forzó con la ecuación (2.9) y al redefinir la base angular del diagrama de ganancia cargado del fichero de texto.

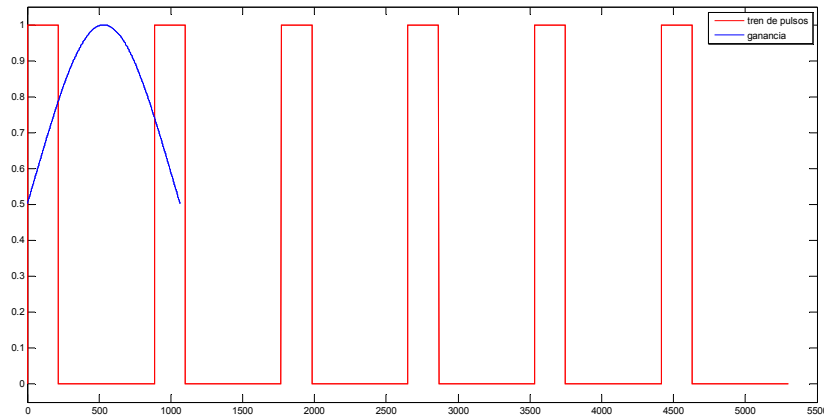


Fig. 2. 16: tren de pulsos y diagrama de ganancia

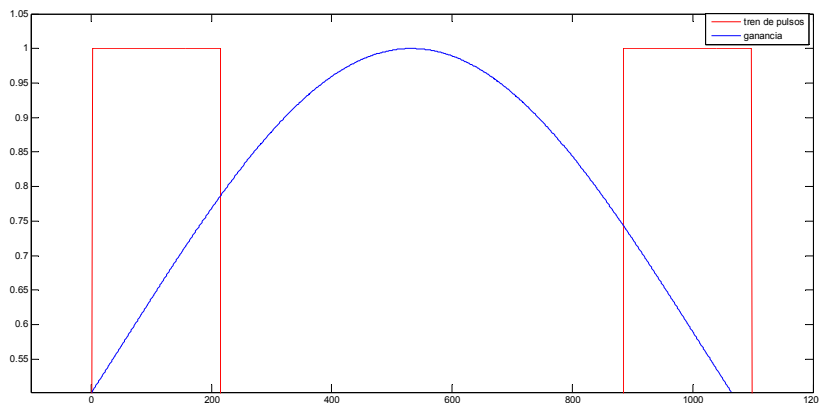


Fig. 2. 17: tren de pulsos y diagrama de ganancia dentro del margen angular de antena

Una vez solapados el diagrama de ganancia y el tren de pulsos únicamente deben multiplicarse entre sí para obtener la parte del diagrama con el que se observa el punto. Sin embargo como puede observarse en la figura 2.17 para este beam el punto está siendo visualizado 2 veces, hecho que solo ocurre con los primeros beams, mientras que las especificaciones marcan que se use un valor de  $L_{az}$  igual a 1 ya que es el valor en otros beams. Este hecho lleva a tener que seleccionar entre el mayor de las dos visualizaciones. En el caso de este beam para este punto correspondiente a  $\theta = -0.1188$  grados, o el primer punto analizado, tras realizar la discriminación queda como se muestra en la figura 2.18 en línea continua de color rojo.

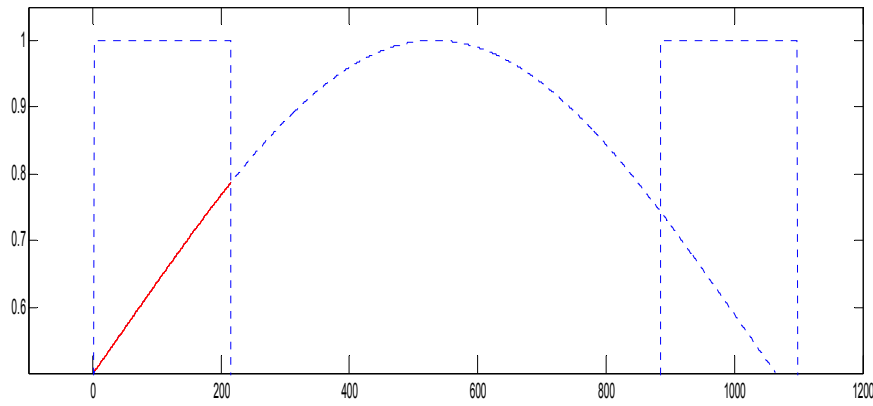


Fig. 2.18: visualización del punto tras la selección de pulso

El resultado de la selección debe multiplicarse por la ventana, de Kaiser en este caso y por la ponderación seleccionada y se obtiene así la potencia de scalloping sin error de Doppler centroid para este punto.

Realizando el mismo proceso con el diagrama de ganancia con error de Doppler centroid se obtiene la potencia de scalloping con error de Doppler centroid, que es el resultado que se desea obtener.

Repitiendo el proceso anterior para todos los puntos calculados se obtiene el perfil de scalloping que es normalizado a 0 dB. Este perfil, para el caso de +100 Hz de error de Doppler centroid, es mostrado en la figura 2.19.

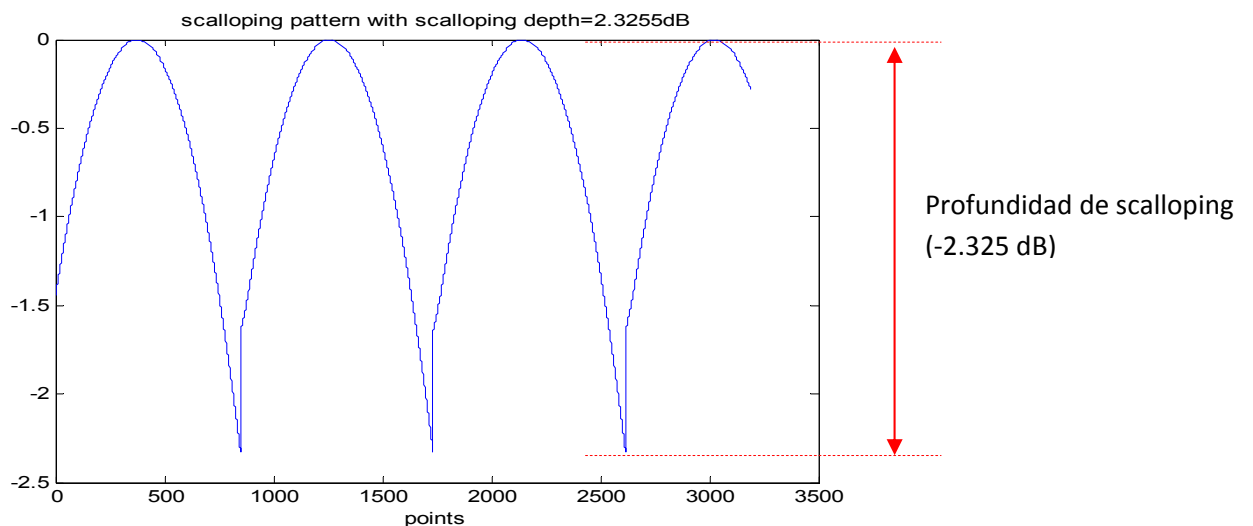


Fig. 2.19: perfil de scalloping para error de 100 Hz de Doppler centroid



De dicho perfil además se puede extraer la profundidad de scalloping obteniendo el mínimo valor en la gráfica, el cual es de -2.105 dB en este caso.

El siguiente paso es repetir el paso anterior para los distintos errores de Doppler centroid y obtener el perfil de profundidad de scalloping en función del error de Doppler centroid. Los errores están definidos de -150 a 150 Hz cada 25 Hz y el resultado puede observarse en la figura 2.20 para la ponderación rectangular y en la figura 2.21 para la ponderación inverso de ganancia.

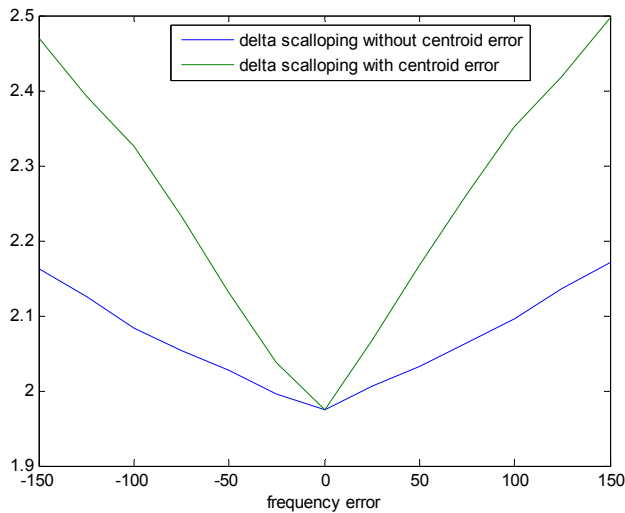


Fig. 2.20: profundidad de scalloping en función del error de Doppler centroid para ponderación rectangular (verde)

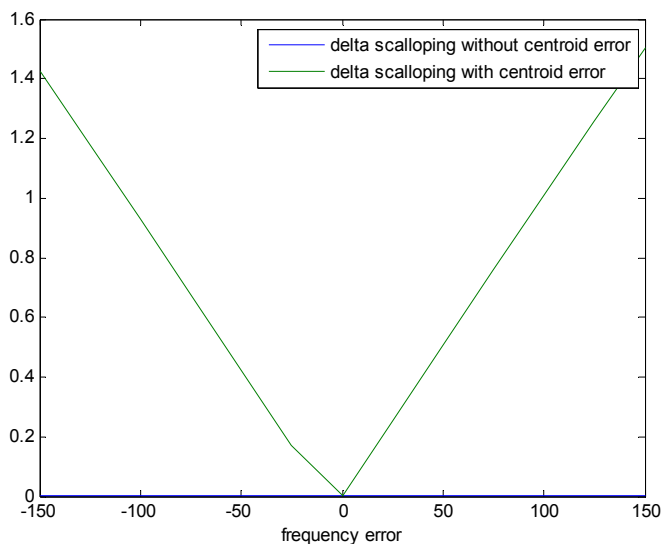


Fig. 2. 21: profundidad de scalloping en función del error de Doppler centroid para ponderación inverso de ganancia (verde)

Como último paso el programa dispone de la opción de calcular la profundidad de scalloping para todos los modos de exploración y todos los beams. El resultado obtenido se muestra en las figuras 2.22 y 2.23. En el anexo 5 se incluyen dichas graficas por separado y los valores numéricos obtenidos para el caso de Paz.

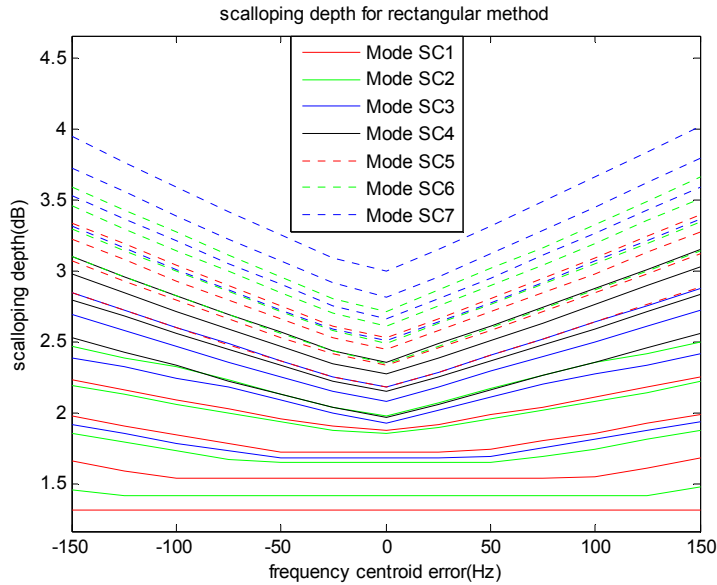


Fig. 2.22: profundidad de scalloping en función del error de Doppler centroid con ponderación rectangular para todos los beams

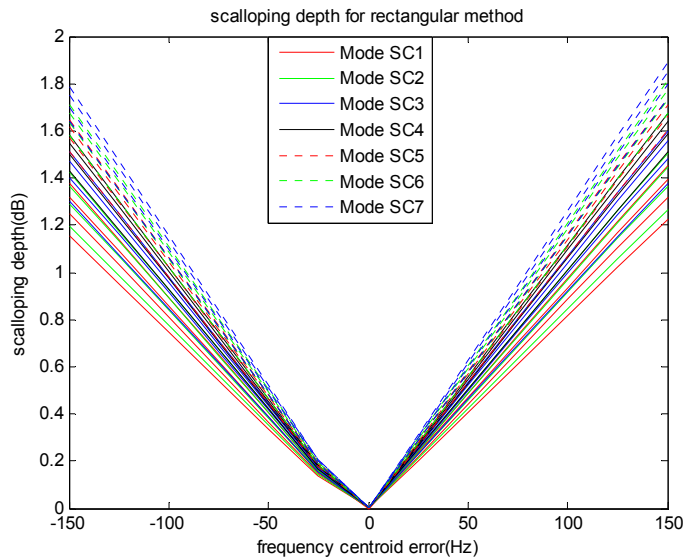


Fig. 2.23: profundidad de scalloping en función del error de Doppler centroid con ponderación inverso de ganancia para todos los beams

## 2.4. Comparación de resultados entre Paz, Radarsat y Envisat

Para finalizar el capítulo se realizará una comparativa entre Radarsat, Envisat y Paz.

Ya que en el caso de Paz la ponderación de Bamler no se emplea la comparación se centrará en la ponderación rectangular e inversa de ganancia, sin embargo en los anexos 2 y 3 se pueden consultar los resultados tanto para Radarsat como Envisat empleando los tres métodos.

Para realizar la comparación de forma sencilla se comparará los valores para un error de Doppler centroid de 0 Hz, +150 Hz y -150 Hz.

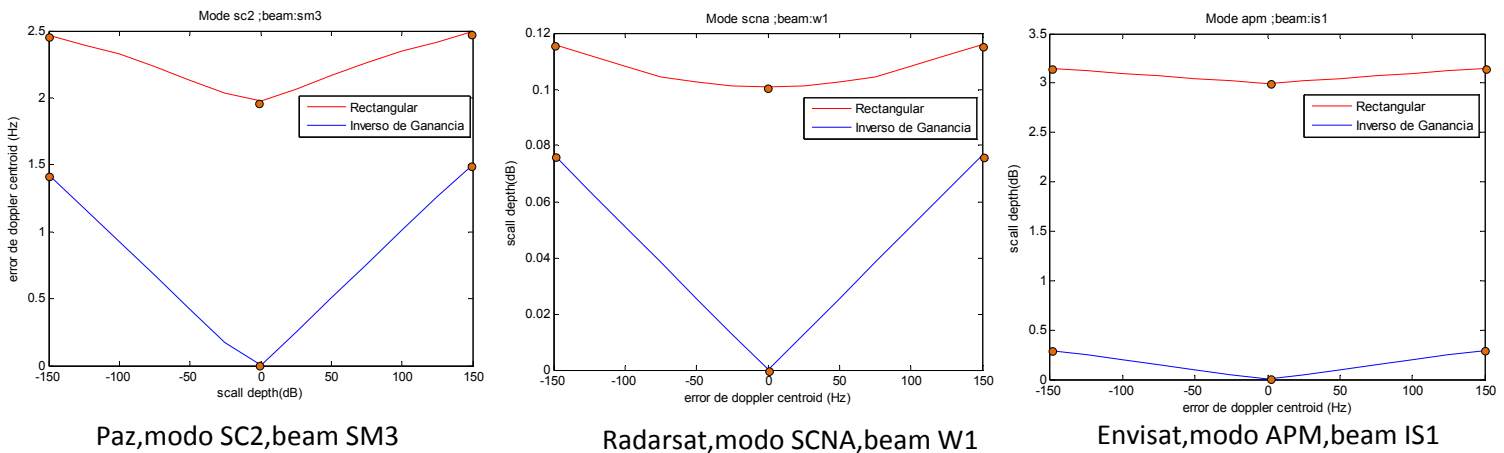


Fig. 2.24: puntos en que se compara la profundidad de scalloping para los métodos rectangular e inverso de ganancia en los satélites Paz(a), Radarsat(b) y Envisat(c)

Para que la lectura de la tabla comparativa sea más sencilla se ha reducido el número de decimales a 2 distintos de 0. Los valores con todos los decimales pueden obtenerse en los anexos pertinentes.

También se adjunta una tabla comparativa con los valores de  $L_{az}$  y  $T_{ciclo}$ .

Comparando ambas tablas se puede llegar a la conclusión de que un menor tiempo de ciclo produce un menor valor de scalloping. Esta conclusión podría razonarse de dos formas:

La primera se basa en el hecho que un menor tiempo de ciclo conlleva que el punto sea visualizado por el radar en un mayor número de ocasiones y aumentaría la probabilidad de que fuera visualizado por el máximo de ganancia de la antena.

El segundo razonamiento se basaría en que cada visualización del punto el valor del error del Doppler centroid producido por el estimador es diferente. Si se supone que

dicho error sigue una distribución gaussiana la media de los errores totales se reduciría por compensación de valores con distinto signo.

Con cualquiera de las dos razones la precisión del estimador de Doppler centroid tiene una gran importancia, no sólo el error medio que produce sino también la varianza de éste, ya que una varianza menor conllevaría que en cada visualización el error fuera más constante.

En la tabla mostrada a continuación se ha empleado nomenclatura de Matlab, en la cual se expresa como E el factor  $10^{-16}$  por lo tanto 9,64E-16 equivale a  $9,64 \cdot 10^{-16}$ .

			Profundidad de Scalloping (dB) - Error Doppler centroid(Hz)					
			Ponderación Rectangular			Ponderación Inverso Ganancia		
Satélite	Modo	Beam	-150 Hz	0 Hz	150 Hz	-150 Hz	0 Hz	150 Hz
PAZ	SC1	SM1	2,22	1,87	2,25	1,37	9,6E-16	1,45
		SM2	1,97	1,72	1,99	1,32	0	1,39
		SM3	1,65	1,53	1,67	1,24	9,6E-16	1,32
		SM4	1,31	1,31	1,31	1,15	1,9E-15	1,22
	SC2	SM3	2,46	1,97	2,49	1,42	1,9E-15	1,50
		SM4	2,19	1,85	2,21	1,36	1,9E-15	1,44
		SM5	1,85	1,64	1,87	1,29	9,6E-16	1,36
		SM6	1,45	1,41	1,47	1,19	9,6E-16	1,26
	SC3	SM7	2,84	2,18	2,88	1,51	2,8E-15	1,60
		SM8	2,69	2,08	2,72	1,47	1,4E-15	1,55
		SM9	2,39	1,93	2,41	1,40	9,6E-16	1,48
		SM10	1,91	1,68	1,93	1,30	9,6E-16	1,37
	SC4	SM11	3,10	2,36	3,15	1,58	1,9E-15	1,67
		SM12	2,97	2,27	3,02	1,54	1,4E-15	1,64
		SM13	2,79	2,14	2,83	1,50	1,4E-15	1,58
		SM14	2,53	1,97	2,55	1,42	1,4E-15	1,51
	SC5	SM15	3,34	2,52	3,39	1,64	2,8E-15	1,74
		SM16	3,22	2,44	3,28	1,61	2,8E-15	1,71
		SM17	3,06	2,33	3,11	1,57	2,4E-15	1,66
		SM18	2,84	2,17	2,88	1,51	3,3E-15	1,60
	SC6	SM19	3,59	2,71	3,66	1,71	1,9E-15	1,81
		SM20	3,45	2,61	3,51	1,67	1,9E-15	1,77
		SM21	3,29	2,49	3,34	1,63	2,8E-15	1,73
		SM22	3,09	2,34	3,14	1,58	2,4E-15	1,67
	SC7	SM23	3,95	2,99	4,02	1,78	3,3E-15	1,89
		SM24	3,73	2,81	3,79	1,74	2,8E-15	1,85
		SM25	3,53	2,66	3,58	1,69	2,4E-15	1,79
		SM26	3,31	2,50	3,37	1,64	3,3E-15	1,73

			Profundidad de Scalloping (dB) - Error Doppler centroid(Hz)					
			Ponderación Rectangular			Ponderación Inverso Ganancia		
Satélite	Modo	Beam	-150 Hz	0 Hz	150 Hz	-150 Hz	0 Hz	150 Hz
RADARSAT	SCNA	W1	0,11	0,10	0,11	0,076	1,9E-15	0,076
		W2	0,70	0,70	0,70	0,012	1,9E-15	0,012
	SCNB	S5	0,25	0,22	0,25	0,091	2,4E-15	0,091
		S6	0,75	0,75	0,75	0,060	3,3E-15	0,060
		W2	1,02	1,01	1,02	0,072	1,9E-15	0,072
	SCWA	S7	0,79	0,79	0,79	0,048	2,4E-15	0,048
		W1	0,89	0,86	0,89	0,094	3,8E-15	0,094
		W2	0,29	0,25	0,29	0,106	2,4E-15	0,106
		W3	0,68	0,68	0,68	0,087	2,4E-15	0,087
	SCWB	S5	0,77	0,77	0,77	0,079	2,4E-15	0,079
		S6	0,76	0,75	0,76	0,040	2,4E-15	0,040
		W1	0,61	0,58	0,61	0,098	3,3E-15	0,098
		W2	0,31	0,28	0,31	0,109	2,4E-15	0,109
ENVISAT (nota 2)	APM	IS1	3,14	2,99	3,14	0,295	2,89E-15	0,295
		IS2	3,14	2,99	3,14	0,294	3,38E-15	0,294
		IS3	3,14	2,99	3,14	0,295	4,34E-15	0,295
		IS4	3,13	2,98	3,13	0,294	1,93E-15	0,294
		IS5	3,14	2,99	3,14	0,294	2,41E-15	0,294
		IS6	3,14	2,99	3,14	0,295	2,89E-15	0,295
		IS7	3,14	2,99	3,14	0,295	2,89E-15	0,295
	WSM	SS1	0,73	0,72	0,73	0,045	1,93E-15	0,045
		SS2	0,70	0,68	0,70	0,049	1,93E-15	0,049
		SS3	0,68	0,66	0,68	0,059	1,93E-15	0,059
		SS4	0,28	0,26	0,28	0,070	2,89E-15	0,070
SS5		0,48	0,48	0,48	0,059	1,45E-15	0,059	

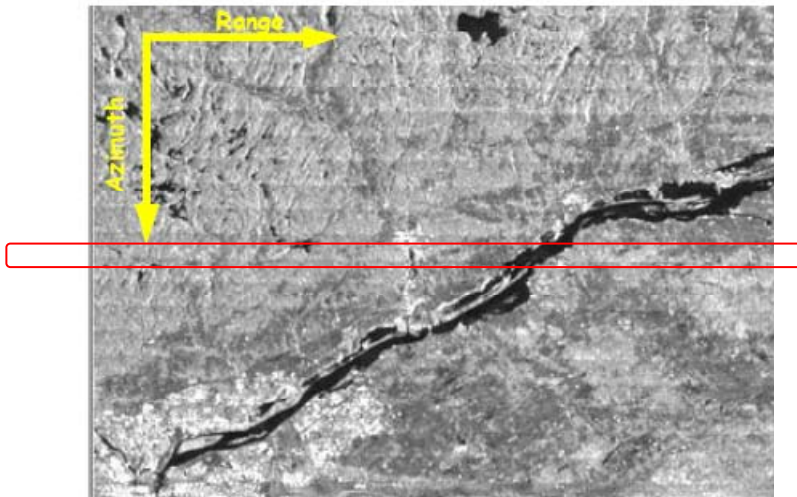
Tabla 2.4: Tabla comparativa del valor de profundidad de scalloping en dB para Paz, Radarsat y Envisat de todos sus beams

Satélite	Modo	L <sub>az</sub>	Tciclo(ms)	Distancia de Scalloping (km)	
				Máximo	Mínimo
PAZ	SC1	1	243.193	1.732	1.730
	SC2	1	252.100	1.796	1.794
	SC3	1	274.898	1.958	1.956
	SC4	1	302.308	2.154	2.151
	SC5	1	333.498	2.376	2.373
	SC6	1	367.728	2.620	2.616
	SC7	1	403.586	2.875	2.872
RADARSAT	SCNA	2	171.530	1.151	1.145
	SCNB	2	193.490	1.299	1.292
	SCWA	2	181.710	1.220	1.213
	SCWB	2	177.170	1.189	1.183
ENVISAT (nota 2)	APM	2	904.110	6.016	5.989
	WSM	3	192.760	1.288	1.277

Tabla 2.5: Tabla comparativa del valor de Laz, Tiempo de ciclo en ms y distancia de scalloping en km para Paz, Radarsat y Envisat de todos sus modos de exploración

### **2.5. Ejemplo ilustrativo del efecto de scalloping**

La variación de potencia en acimut producida por scalloping conlleva que, por ejemplo, una superficie plana sea visualizada por el radar como si fuera rugosa. Este efecto puede llegar a ser apreciable en una imagen radar en forma de líneas de menor intensidad como se muestra en la figura 2.25.



*Fig. 2.25: imagen tomada de Envisat en modo APM (ref. [2.3])*

Más grave que el efecto mostrado en la figura 2.25 es el caso en que el radar sea utilizado para detectar blancos y/o medir su velocidad, pudiendo ser dicha medida errónea debido al scalloping. Tomando como ejemplo que la aplicación consistiera en transmitir una señal a una frecuencia concreta y se midiera la velocidad de los barcos a partir de la medida de la frecuencia Doppler con que estuvieran afectadas las señales de los ecos que retornan al radar, si se detectaran dos barcos que navegan a igual velocidad pero en direcciones distintas y uno de los barcos estuviera afectado por un valor de scalloping superior al otro, la medición de su velocidad podría ser inviable ya que no se detectaría dicha señal de eco y por lo tanto se podría concluir que está parado como se muestra en las siguientes figuras, habiendo detectado la existencia de dicho barco a partir de otras medidas como polarización o potencia de señal.

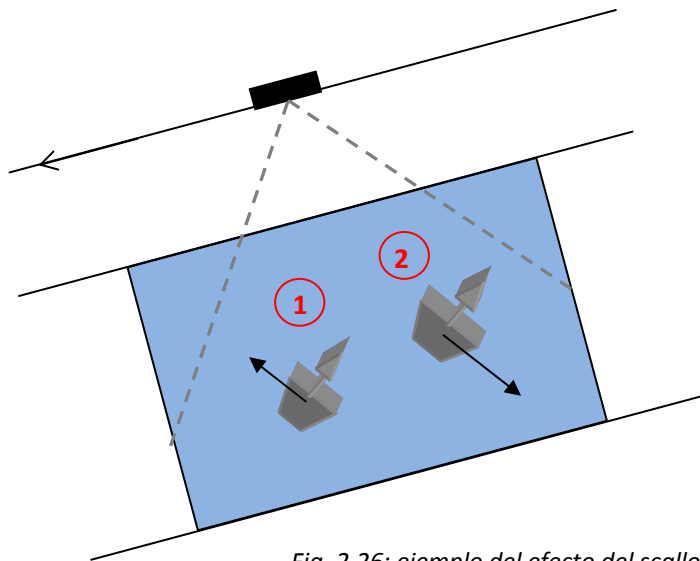


Fig. 2.26: ejemplo del efecto del scalloping

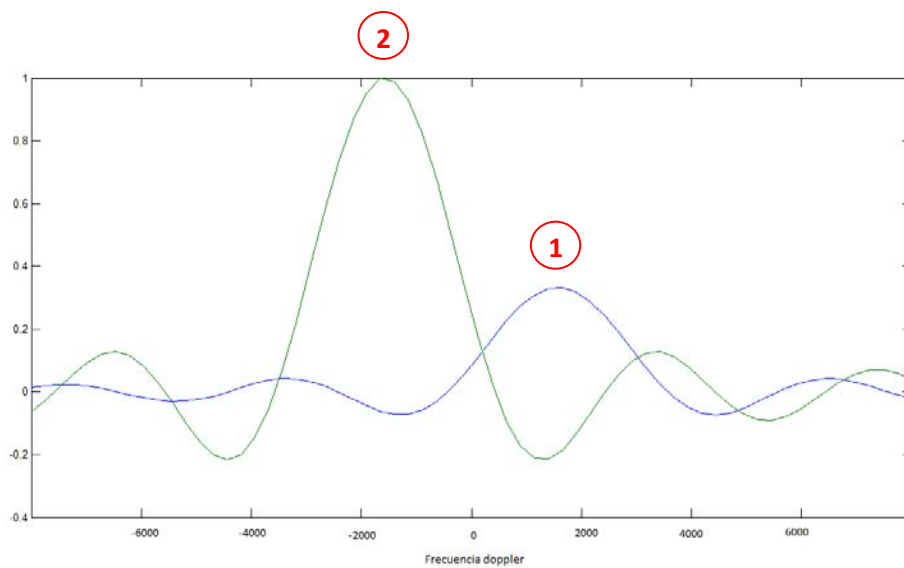


Fig. 2.27: ejemplo del efecto del scalloping

Este ejemplo mostrado en las figuras 2.26 y 2.27 es en el supuesto que se realizara una medida de velocidad a partir del estudio de frecuencia Doppler, hecho que debido al movimiento del satélite es poco frecuente.

En el capítulo 5 se detallan algunos métodos orientados a la detección de barcos y en el capítulo 6 se propone un posible método para realizar la identificación, además de los posibles inconvenientes presentes en estos métodos.



## **2.6. Referencias y notas**

### **Notas**

Nota 1: para más información consultar la referencia [2.1] capítulo 9 o la referencia [2.2]

Nota 2: el estudio del modo GMM de Envisat se ha descartado por falta de información sobre su funcionamiento.

### **Referencias**

[2.1]: “Digital Processing Of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and Implementation”; Ian G. Cumming, Frank H. Wong; Ed. Artech House

[2.2]: “Radiometric Correction in Range-SPECAN SAR Processing”; Haleh Hobooti; University of British Columbia

[2.3]: “Modelling SAR scalloping in burst mode products from Radarsat-1 and Envisat”; RK Hawkins, PW Vachon

[2.4]: “Optimum Look Weighting for Burst-Mode and ScanSAR Processing”; Richard Bamler

## **Capítulo 3**

# **Análisis del error de scalloping en el modo TopSAR**

### **3.1. Introducción**

Como se ha visto en el capítulo anterior el error radiométrico de scalloping aparece en los radares que operan con señales a ráfagas tanto en modos de área extendida, por ejemplo ScanSAR, como en modos normales en los que el radar se apaga para ahorrar baterías como podría ser StripMAP, aunque esta operación en la práctica es poco frecuente.

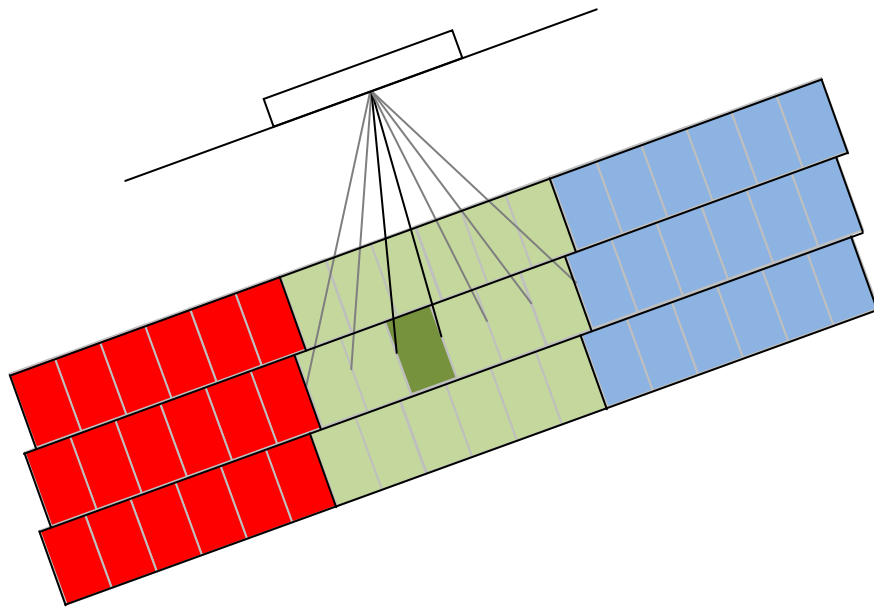
Dicho efecto supone desde una disminución de la calidad de las imágenes tomadas por el radar hasta la imposibilidad de realizar tareas de detección por parte de éste y la única vía para reducir su efecto es a partir de la obtención de estimadores de frecuencia Doppler del centroid de gran calidad, pero, por muy preciso que fuese dicho estimador siempre quedaría un residuo de scalloping. Dicho residuo, para el caso de Paz, es de unos 0.2 dB con un error de 10 Hz de estimación.

Para combatir este efecto derivado de la utilización del modo ScanSAR, muy extendido actualmente en los radares incorporados en satélites, en los últimos años se ha desarrollado un nuevo modo de exploración de sistemas SAR a partir de los conceptos que implican el funcionamiento de ScanSAR. Dicho modo se denomina TopSAR (Terrain Observation by Progressive Scan SAR), fue propuesto por Attema (ESA-ESTEC) y Rocca (POLIMI) y descrito en la referencia [3.1]. Para el desarrollo de la presente memoria también se ha empleado la referencia [3.2]. Actualmente sigue en fase de investigación y pruebas mediante el satélite TerraSAR-X, aunque diversos satélites de futuro lanzamiento, entre ellos Paz, están considerando su implementación.

### **3.2. Descripción teórica de los modos TopSAR y TopSAR inverso**

TopSAR aprovecha al máximo las prestaciones de la utilización de antenas de tipo array ya que se basa en combinar la conmutación angular en la dirección de elevación o range propia de ScanSAR y una conmutación en la dirección perpendicular o acimutal en forma de barrido.

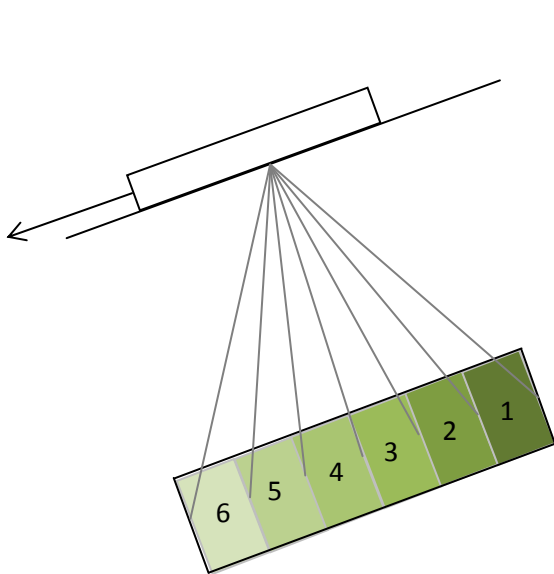
Básicamente, el funcionamiento de este modo consiste en realizar un barrido acimutal mientras el radar está observando un swath en range. En la siguiente figura se muestra un ejemplo para un modo de 3 swaths.



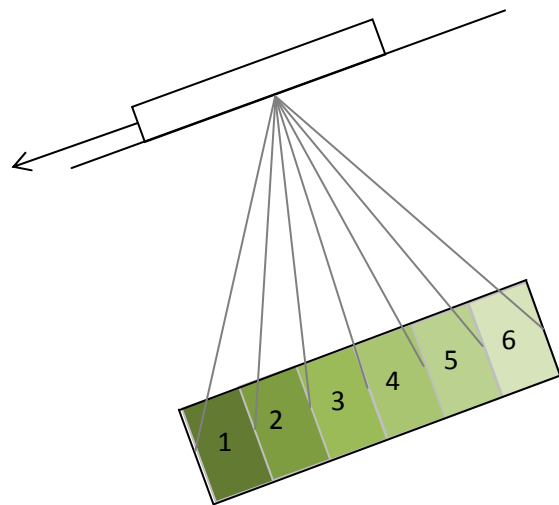
*Fig. 3.1: representación del modo de exploración TopSAR*

Cada uno de los colores representa los swaths vistos por el radar en un tiempo de ciclo.

Este barrido en la dirección de acimut puede realizarse de 2 formas distintas en función de si se realiza en la misma dirección que el movimiento del satélite o en la dirección contraria. El primero de ellos se denomina modo TopSAR y el segundo TopSAR Inverso. En las figuras 3.2 y 3.3 se pueden observar las dos opciones, centrándose únicamente en uno de los swaths observados.



*Fig. 3.2: modo TopSAR*



*Fig. 3.3: modo TopSAR inverso*

La dirección en que se realiza el barrido angular es la misma que la utilizada en el modo Spotlight, el cual realiza una variación en la dirección opuesta al movimiento del satélite. Por lo cual en el modo TopSAR la variación sería contraria al modo Spotlight y el modo TopSAR Inverso en la misma dirección que dicho modo pero más rápida.

La variación más significativa entre ambos modos radica básicamente en la tasa de variación angular (*steering rate*) manteniendo la misma resolución acimutal, como se verá posteriormente.

Para ambos modos la geometría es similar tal como se muestra en las figuras 3.4 y 3.5, en las que se pueden observar los parámetros descritos en la siguiente tabla.

Parámetro	Descripción
$k_\theta$	Steering rate o tasa de conmutación en ángulos por segundo
$T_B$	Tiempo de ráfaga en que el radar visualiza un swath
$T_R$	Tiempo de ciclo, en el cual se visualizan los 3 (según el dibujo) o 4 swaths
$r_{mid}$	Distancia media entre el satélite y el swath en observación
$\Delta\theta$	Incremento angular realizado en cada conmutación
$h_{sat}$	Distancia del satélite al punto de nadir
$V_s$	Velocidad de desplazamiento del satélite

Tabla 3.1: Descripción de parámetros de geometría de TopSAR

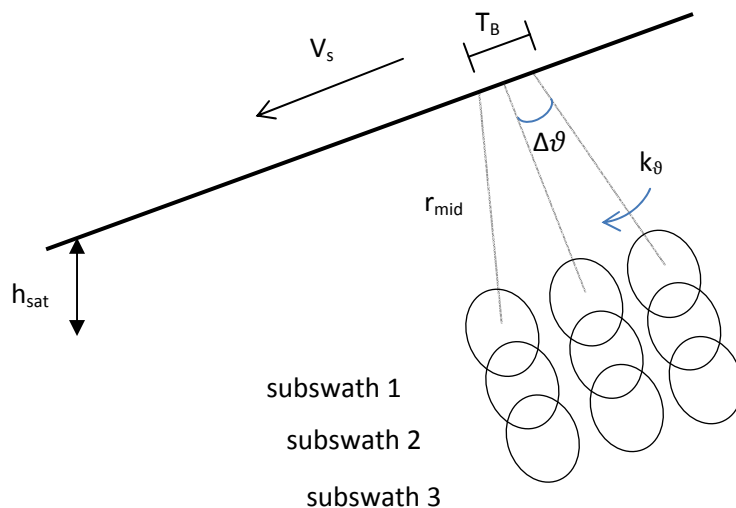


Fig. 3.4: Geometría de TopSAR, observando sólo un ciclo( $N=3$ )

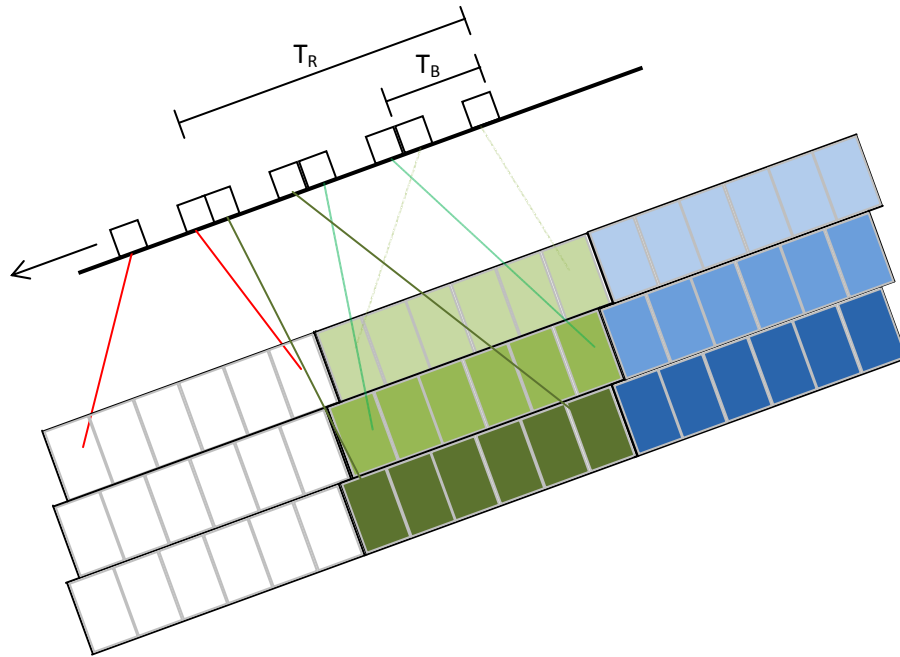


Fig. 3.5: Geometría de TopSAR, observando diversos ciclos ( $N=3$ )

### 3.2.1. Descripción teórica y matemática de TopSAR

Tanto en ScanSAR como en TopSAR se pueden definir cuatro tiempos con los que opera el radar:

- El tiempo de ráfaga ( $T_B$ ): tiempo en que el radar permanece observando un swath y realizando la transmisión de pulsos.
- Tiempo de dwell ( $T_{DWELL}$ ): tiempo en que el radar está observando un punto del swath
- El tiempo de guarda ( $T_G$ ): tiempo que sirve para distanciar las observaciones consecutivas de un mismo swath. Su efecto puede observarse en la siguiente figura.



Fig. 3.6: Efecto del tiempo de guarda

En el caso de Paz, la suma de los tiempos de ráfaga es lo suficientemente alta como para que no se produzca dicho solapamiento y este valor pueda ser cero

- El tiempo de ciclo ( $T_C$  o  $T_R$ ): es el tiempo que emplea el radar en observar los  $N$  swaths y volver al punto inicial. Su valor se obtiene como la suma de los tiempos de ráfaga para los  $N$  swaths más el valor del tiempo de guarda. Siendo  $N$  el número de conmutaciones realizadas en la dirección range.

En el modo ScanSAR el tiempo de dwell y el tiempo de ráfaga eran iguales, pero en el modo TopSAR, debido a la conmutación angular, el tiempo de ráfaga es superior al tiempo de dwell. Esta diferencia repercute directamente en la resolución con la que se observa dicho blanco, siendo la resolución de TopSAR mayor que la de ScanSAR, aunque en la práctica los valores de resolución de ambos modos son similares. Por ejemplo, el modo ScanSAR de TerraSAR-X trabaja con una resolución de 16 metros, mientras que el análisis de TopSAR realizado en este proyecto se realiza con una resolución de 20 metros.

Dicha variación de resolución está relacionada con la tasa angular de steering ( $k_\theta$ ) y se obtiene a partir de la suposición que el diagrama de radiación se puede aproximar como una función sinc al cuadrado, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$G_T = G_0 \cdot \text{sinc}^2 \left( \frac{L \cdot v \cdot \tau}{\lambda \cdot R_0} \right) \quad (3.1)$$

Siendo  $L$  la longitud de la antena en acimut,  $v$  la velocidad del blanco,  $\lambda$  la longitud de onda y  $R_0$  la distancia del radar al swath.

A partir de la ecuación (3.1), el diagrama observado por un punto puede obtenerse con la siguiente ecuación

$$G_T = G_0 \cdot \text{sinc}^2 \left( \frac{L}{\lambda} \cdot \left( \frac{v \cdot \tau}{R_0} + \vartheta(\tau) \right) \right) \approx G_0 \cdot \text{sinc}^2 \left( \frac{L \cdot v \cdot \tau}{\lambda \cdot R_0} \cdot \left( 1 + \frac{R_0 \cdot k_\theta}{v} \right) \right) \quad (3.2)$$

En que  $\vartheta(\tau)$  es el ángulo de rotación de la antena en función del tiempo  $\tau$ . Idealmente es una recta pero en la práctica se aproxima por una función de tipo escalón, como puede observarse en la siguiente figura.

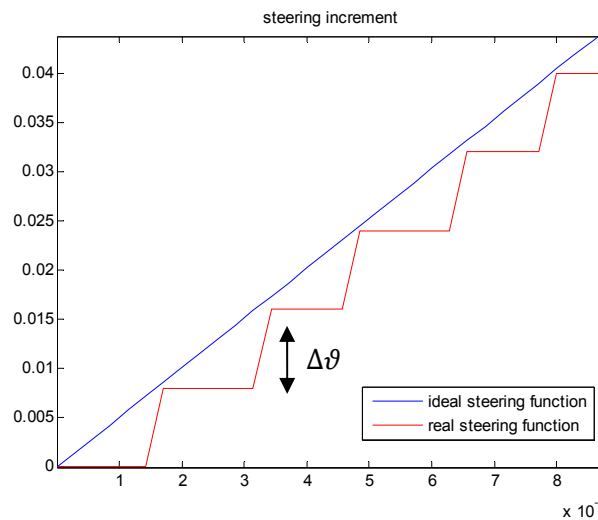


Fig. 3.7: función de steering real (rojo) e ideal (azul)

A partir de la ecuación (3.2) se puede determinar que la pérdida de resolución en TopSAR respecto de la obtenida con StripMAP se produce en un factor  $\alpha$ :

$$\alpha = 1 + \frac{R_0 \cdot k_\vartheta}{v} \quad (3.3)$$

Con lo se obtendría una resolución final:

$$\rho_{az}^{TOPS} = \rho_{az}^{STRIP} \cdot \alpha = \frac{\lambda}{2 \cdot \vartheta_0} \cdot \left(1 + \frac{R_0 \cdot k_\vartheta}{v}\right) \quad (3.4)$$

Siendo  $\vartheta_0$  el ancho de haz del diagrama de radiación de SAR, en radianes.

Comúnmente la resolución es un parámetro fijado y se desea conocer la tasa de steering necesaria para conseguir dicha resolución, con lo que la ecuación quedaría de la siguiente forma:

$$k_\vartheta = \left(\frac{2 \cdot \rho_{az} \cdot \vartheta_0}{\lambda} - 1\right) \cdot \frac{v}{R_0} \quad (3.5)$$

Pero los valores de velocidad, distancia y ancho de haz varían para cada swath, por lo la tasa de steering debe calcularse para cada swath que se analice. Siendo  $n$  el swath que está siendo visualizado por el radar, la ecuación correcta sería la siguiente:

$$k_\vartheta^n = \left(\frac{2 \cdot \rho_{az} \cdot \vartheta_0^n}{\lambda} - 1\right) \cdot \frac{v^n}{R_0^n} \quad (3.6)$$

Una vez calculada la tasa de steering, sólo queda calcular los valores de tiempo de ráfaga ( $T_B$ ) y tiempo de ciclo ( $T_R$ ) para definir la base temporal.

El valor de tiempo de ciclo se puede calcular como la suma de los tiempos de ráfaga más un tiempo de guarda para controlar el solapamiento entre los sucesivos swaths en acimut, como se ha visto en la figura 3.6:

$$T_R = \sum_n T_B^n + T_G^n \quad (3.7)$$

El valor del tiempo de ciclo y de los tiempos de ráfaga deben cumplir las  $n$  ecuaciones determinadas por la siguiente relación:

$$(k_\vartheta^n \cdot T_B^n - \vartheta_0^n) \cdot R_0^n + v^n \cdot T_B^n = v^n \cdot T_R \quad (3.8)$$



De las ecuaciones (3.7) y (3.8) se puede concluir que un aumento del tiempo de guarda conllevaría un aumento de la tasa de steering,  $k_{\vartheta}^n$ , y por tanto a un aumento de la resolución acimutal.

### **3.2.2. Descripción teórica y matemática de TopSAR inverso**

En el modo TopSAR Inverso la variación angular se realiza en la dirección opuesta al movimiento del satélite, o en la misma dirección que el modo Spotlight.

La diferencia entre TopSAR y TopSAR Inverso radica en el hecho que el movimiento del satélite se produce en contra del steering, por lo que se requiere una tasa de steering más alta, lo que produce un empeoramiento en las prestaciones, principalmente resolución, de este modo.

La tasa de steering en este modo,  $k_{i\vartheta}$ , puede obtenerse a partir del modo TopSAR imponiendo la siguiente condición:

$$\left| 1 + \frac{k_{\vartheta} \cdot R_0}{v} \right| = \left| 1 - \frac{k_{i\vartheta} \cdot R_0}{v} \right| \quad (3.9)$$

Despejando  $k_{i\vartheta}$  se obtiene la tasa de steering para TopSAR Inverso:

$$k_{i\vartheta} = \frac{2 \cdot v}{R_0} + k_{\vartheta} \quad (3.10)$$

Igual que se mostró en la ecuación (3.6) para TopSAR el valor de steering debe calcularse para cada swath en particular y deben cumplirse las mismas condiciones que se mostró en la ecuación (3.8).

$$k_{i\vartheta}^n = \frac{2 \cdot v^n}{R_0^n} + k_{\vartheta}^n \quad (3.11)$$

$$(k_{i\vartheta}^n \cdot T_B^n - \vartheta_0^n) \cdot R_0^n + v^n \cdot T_B^n = v^n \cdot T_R \quad (3.12)$$

Para finalizar esta sección cabe decir que ambos modos no son excluyentes y que pueden conmutarse entre sí para un punto según la posición en acimut.

### 3.2.3. Realización e implicación de la variación angular

Para finalizar esta sección mencionar que la variación angular en acimut se puede llevar a cabo mediante una rotación mecánica de la antena o mediante una rotación electrónica del diagrama de radiación de la antena gracias a la utilización de antenas de tipo phased-array. La segunda opción es la empleada en la práctica debido a que la rotación mecánica presenta problemas de estabilidad de posicionamiento de la antena y una mayor dificultad de realización. Sin embargo, la utilización de una rotación electrónica implica que se debe tener en cuenta el diagrama de radiación de un único elemento del array, el cual se puede aproximar como una función sinc al cuadrado, y al realizar la variación angular se observará cada punto de la escena con diferente ganancia. Este hecho conlleva la aparición de un pequeño scalloping residual. El diagrama resultante surge de multiplicar el diagrama de un elemento con los diagramas equivalentes del array desplazados en acimut.

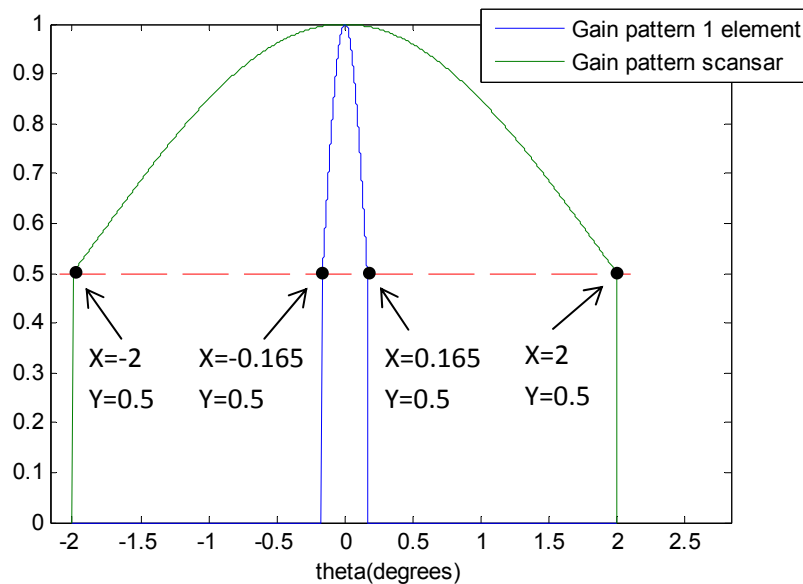


Fig. 3.8: diagrama de ganancia de 1 elemento del array (verde) y de ScanSAR (azul)

El diagrama de un único elemento del array puede considerarse que es determinista o que se obtiene a partir de la estimación de la frecuencia central del espectro Doppler o Doppler centroid. Ambas consideraciones, además del efecto que conlleva una reducción del ancho de haz de dicho diagrama, serán estudiadas en las próximas secciones junto con los resultados obtenidos, pero se puede adelantar que cualquiera de las dos opciones conlleva una variación del scalloping residual muy reducida.

En los posteriores apartados se describirá el proceso práctico realizado bajo el programa BUMSA para analizar el scalloping en el satélite Paz con el modo TopSAR y se proporcionarán los resultados obtenidos.

### 3.3. Estudio de scalloping en TopSAR en Paz con la aplicación BUMSA

#### 3.3.1. Introducción

Aunque el satélite Paz dispone de 7 modos de exploración y 28 beams que van del SM1 al SM26, en el momento de la realización de este proyecto sólo se disponía de la información de 6 modos y 24 beams para el modo TopSAR. Por lo que el análisis del scalloping, así como cualquier comparación con ScanSAR se limita a estos beams.

Para la descripción práctica y de resultados del modo TopSAR se ha optado por realizar el análisis únicamente en Paz, ya que los satélites Radarsat y Envisat no disponían de dicho modo de exploración y el programa BUMSA no dispone de la pertinente información concerniente a anchos de haz y duración de ráfaga de dichos satélites necesaria para realizar los cálculos en TopSAR.

Para mostrar los ejemplos gráficos en cada paso se ha optado por seleccionar el modo de exploración SC2, el beam SM3 y una ventana rectangular, ya que el tipo de ventana empleada no es relevante en el cálculo del scalloping.

Aunque el programa sigue disponiendo de las opciones de ponderación inversa en acimut y Bamler, la selección de éstas realiza las mismas operaciones y proporciona los mismos resultados que la ponderación rectangular ya que en TopSAR no se realiza ninguna ponderación, salvo en el caso de considerar un posible error de estimación del Doppler centroid del diagrama de ganancia de un único elemento del array, como se verá posteriormente.

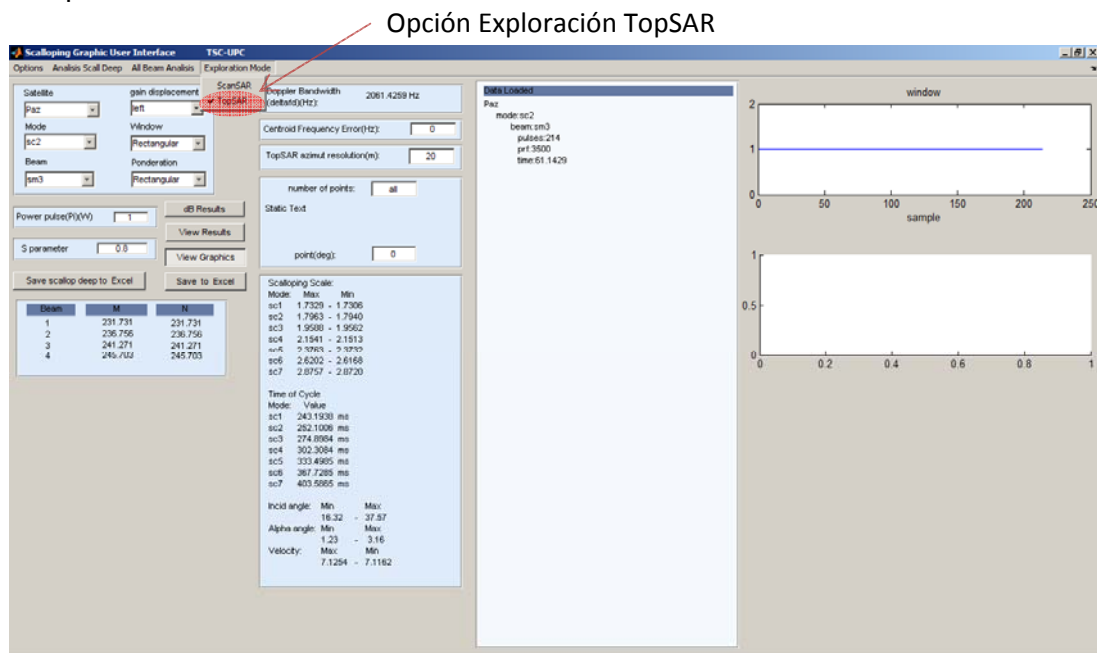


Fig. 3.9: Aplicación BUMSA (Burst Modes Scalloping Analyzer) para cálculo de scalloping

Para realizar el análisis debe activarse la opción TopSAR del menú *EXPLORATION MODE*. Aparecerá una ventana aconsejando que se seleccione de nuevo el satélite, modo, beam, etc. Esto es debido a los cambios de los datos utilizados para el modo ScanSAR y TopSAR.

Un parámetro muy importante es el valor de resolución acimutal a partir del cual se realizan los cálculos de tasa de steering como se ha visto en la ecuación (3.5). Por defecto dicho valor es de 20 metros.

El parámetro de número de puntos tiene por defecto un valor de 'all' que no es modificable en el caso de TopSAR.

La carga de datos orbitales y de satélite es equivalente al explicado anteriormente en ScanSAR, por lo que de aquí en adelante la explicación se desarrollará a partir del punto en que se produce la llamada a la función que realiza el cálculo del scalloping y se describirá como una sucesión de pasos.

### **3.3.2. Pasos para el cálculo del scalloping**

El primer paso que realiza la función es calcular el ancho de haz del diagrama de radiación del elemento único del array. Para ello se realiza una llamada a la función *SS\_param\_interface(height,path)* obtenida del proyecto referenciado en [3.3] que guarda en el fichero *subswaths\_results.dat* los valores de ángulo de elevación ( $\phi$ ), y distancia inclinada entre el radar y el swath (*slant range*), ambos para el punto central del swath para cada beam. El valor de ambas variables para el beam seleccionado es:

$\phi=19.9443$  grados

$\text{slant range}=539.8148$  km

Con el ángulo en acimut ( $\theta$ ) definido entre -10 y 10 grados, se calcula el diagrama de radiación en acimut a partir de la siguiente formula extraída del documento referenciado en [3.4]:

$$E_{\theta} = \frac{jke^{jkr}}{2\pi r} \cdot \frac{\sin\left(\frac{kl}{2} \sin\theta \cos\phi\right)}{\frac{kl}{2} \sin\theta \cos\phi} \cdot \cos\left(\frac{kl}{2} \sin\theta \sin\phi\right) \cdot \frac{\sin(8kd_x \sin\theta \cos\phi)}{\sin(0.5kd_x \sin\theta \cos\phi)} \sin\phi \quad (3.13)$$

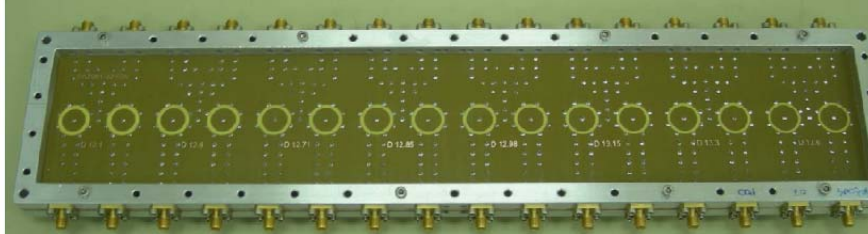
Y empleando los siguientes valores extraídos del mismo documento

$$k = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} = 202.6834 \text{ m}^{-1}$$

$l = 16 \text{ mm}$

$d = 24.9 \text{ mm}$

Subarray: Prototipo



Subarray: UPC

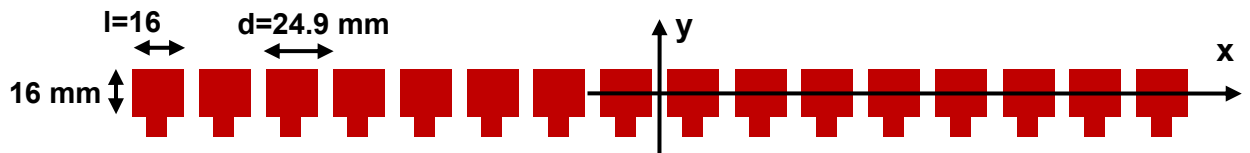


Fig. 3.10: Subarray: prototipo ECE y modelo UPC

Los valores obtenidos de la ecuación (3.13) se elevan al cuadrado, se dividen por el máximo de ellos y se transforman a dB, obteniendo para el beam en estudio el diagrama mostrado en la figura 3.11. Además se calcula el ancho de haz a -3dB, que para este caso en concreto son 4,1993 grados.

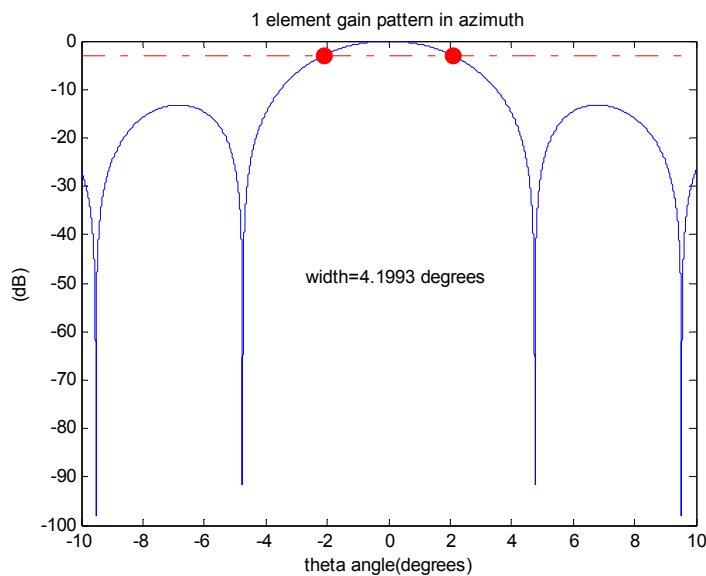


Fig. 3.11: diagrama de radiación de un único elemento del array en azimuth

En el siguiente paso se definen la longitud de la antena ( $L = 4.8$  metros) y el valor *steer* que marca el incremento angular que se realiza en cada conmutación de haz, que en este caso es de 0.008 grados

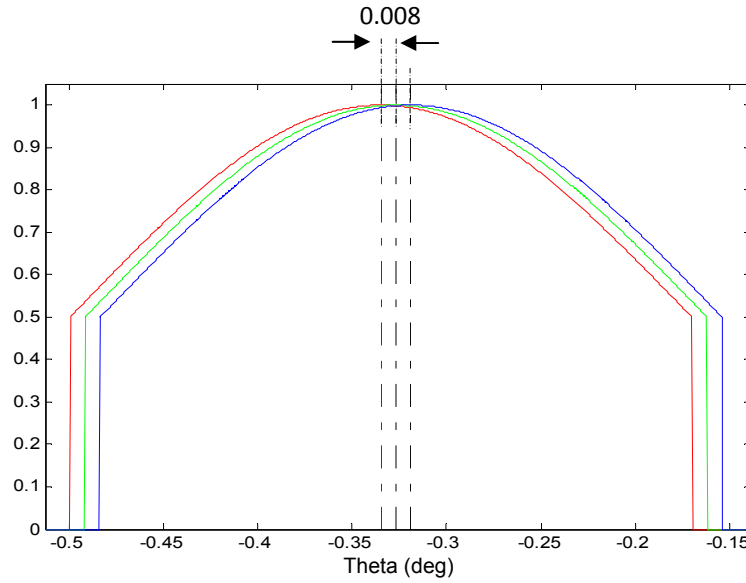


Fig. 3.12: realización de las 3 primeras conmutaciones del diagrama de ganancia con un steer de 0.008 grados/conmutación

Tras esto se carga el fichero *subswaths.dat* del cual se lee el valor del ancho de haz del diagrama de ganancia de cada uno de los beams para el modo TopSAR, este ancho de haz es de 0.33 grados para todos los beams. Con esto se tienen los parámetros necesarios para definir dicho diagrama en forma de sinc<sup>2</sup> con la función *gainestimator*, la cual a partir de la función (3.14) incrementa de forma iterativa el valor del parámetro *factor*, comenzando por cero, hasta que cumpla una condición predefinida, típicamente que el valor de ganancia en los extremos sea menor o igual que 0.5.

$$G_T = G_0 \cdot \text{sinc}^2 \left( \text{factor} \cdot \frac{L \cdot v \cdot \tau}{\lambda \cdot R_0} \right) \quad (3.14)$$

El resultado para el beam en estudio se puede observar en la figura 3.13

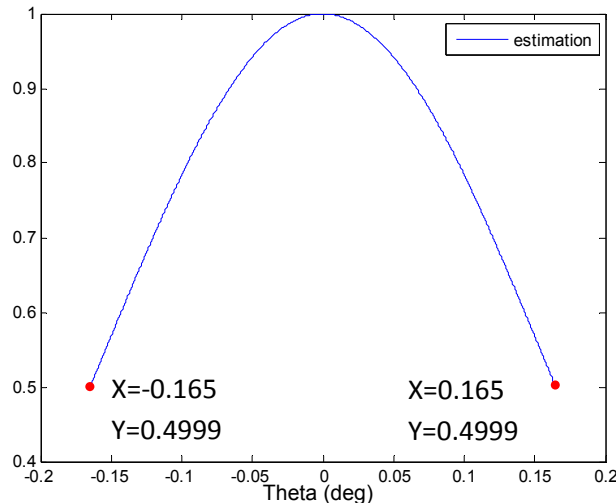


Fig. 3.13: resultado del diagrama de radiación de ScanSAR parametrizado

El mismo proceso se realiza para obtener el valor de *factor* para el diagrama de radiación de un único elemento, cuyo resultado puede observarse en la figura 3.14.

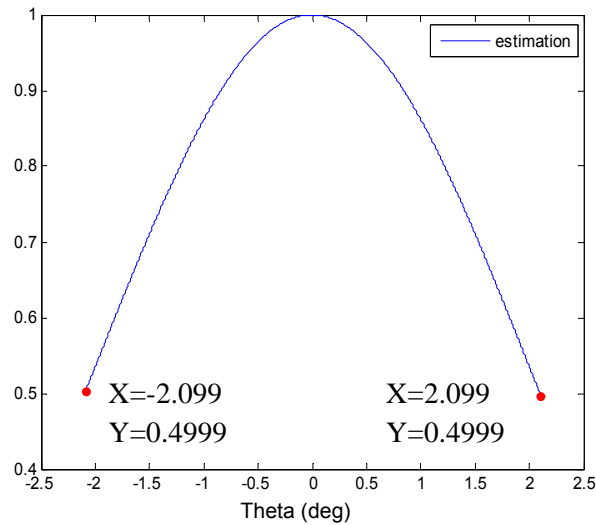


Fig. 3.14: resultado del diagrama de radiación de un elemento del array parametrizado

El siguiente paso consiste en calcular los valores de tiempo de ciclo,  $T_R$ , tasa de steering ( $^{\circ}/\text{seg}$ ), *steer rate*, el tiempo de ráfaga, *burst time*, el tiempo de dwell, *dwell time* y el steering máximo o variación angular máxima, *steer max*. Los cálculos necesarios para obtener dichos valores los realizan las funciones *SS\_param\_interface* y *tops2\_interface* implementadas en la referencia [3.2] y guardando los resultados en el fichero *tops\_param.dat*.

Los valores obtenidos en el caso del beam en estudio son los siguientes:

<i>steer_rate</i>	:	5.0538 $^{\circ}/\text{seg}$
<i>burst_time</i>	:	0.1246 seg
<i>dwell_time</i>	:	0.0640 seg
<i>steer_max</i>	:	$\pm 0.3148^{\circ}$

El próximo paso consiste en calcular la función que define el valor de steering en función del instante temporal. Para ello primero se define la base temporal que va de 0 hasta el tiempo de ráfaga con una resolución  $\frac{1}{PRF}$ , que en este caso tiene un valor de  $2.7211 \cdot 10^{-4}$  segundos. A partir de la base temporal se obtiene la función que define el steering multiplicando dicha base temporal por la variable *steer rate*. El resultado obtenido en este beam puede observarse en la fig. 3.15.

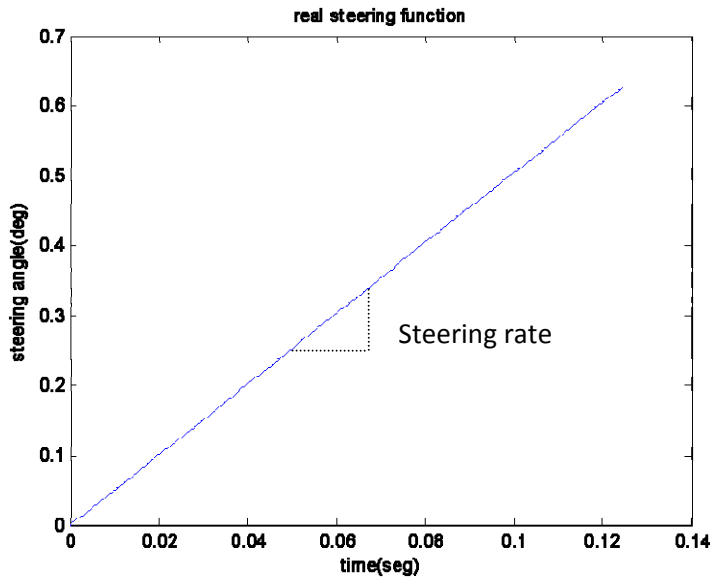


Fig. 3.15: función de steering ideal relativa al steering mínimo

Sin embargo la utilización de la función anterior sería poco práctico ya que el número de conmutaciones que debería realizar la antena sería desorbitado. En el caso mostrado en la figura correspondería a un número de 458 conmutaciones, una cada  $\frac{1}{PRF}$  segundos.

Por ello se emplea una aproximación de tipo escalera, en que cada incremento corresponde al valor de steer (0.008) y se produce cada  $\frac{steer}{steer\_rate}$  segundos (0.0016).

El resultado puede observarse en la figura 3.16

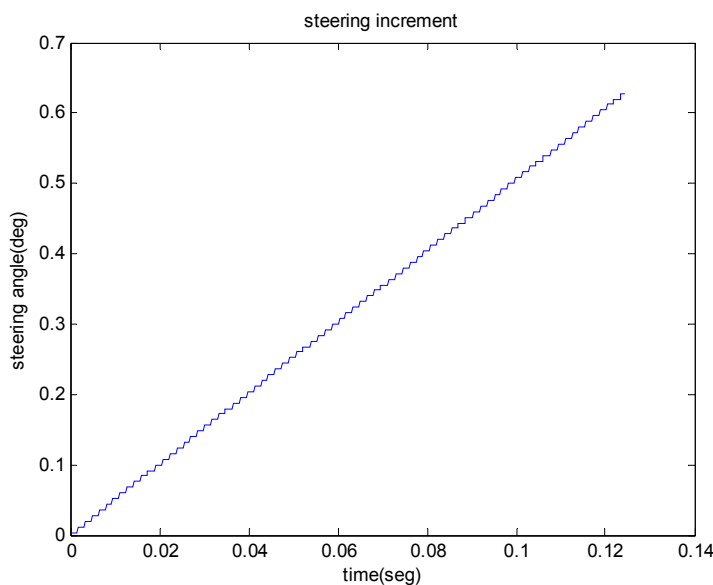


Fig. 3.16: función de steering real relativa al steering mínimo



En la siguiente figura se observa la superposición de ambas funciones. En este caso la aproximación se inicia con un valor de  $\frac{steer}{2}$  (0.004), aunque también podría haberse iniciado con un valor de 0 grados.

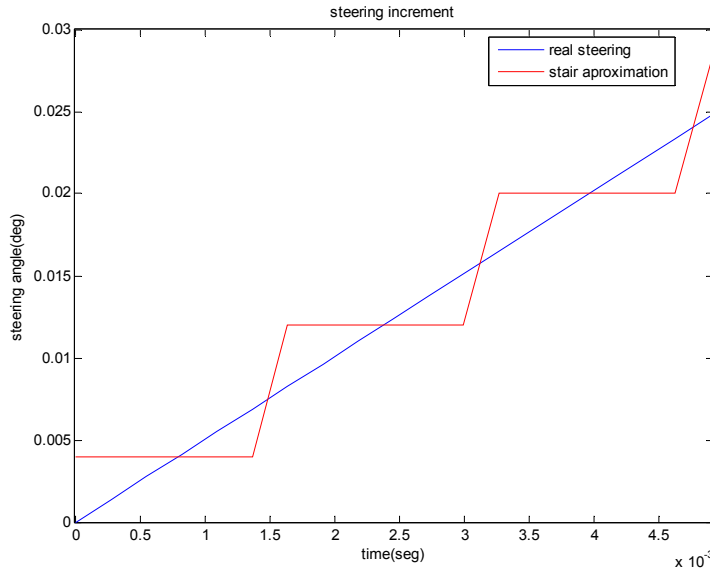


Fig. 3.17: función de steering ideal (azul) y función de steering real (rojo)

Las 2 funciones de steering calculadas anteriormente se pueden considerar como si fuesen angularmente relativas al máximo steering negativo o incrementales a -steer\_max. Para obtener el ángulo de steering absoluto sólo se deben restar a las funciones anteriores el valor de steering máximo, obteniendo el resultado mostrado en la siguiente figura, tanto para la función de steering real como para su aproximación.

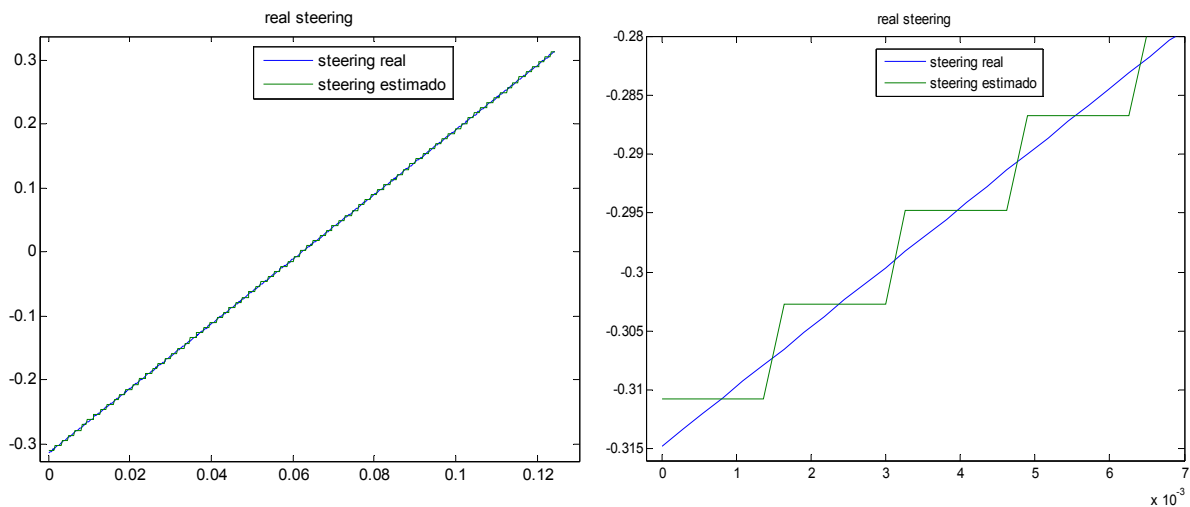


Fig. 3.18: función de steering ideal (azul) y función de steering real (verde) absolutas

El próximo paso consiste en definir una base angular provisional con una longitud 4 veces el steering máximo y una resolución calculada mediante la siguiente función:

$$angres = timeres \cdot \frac{V_b}{R} \cdot \left(\frac{180}{\pi}\right) \quad (3.15)$$

Con dicha base angular se crea el tren de pulsos en que cada pulso tiene una duración  $T_{DWELL}$  y están separados cada  $T_R$  segundos. En este caso el tren está formado por 2 pulsos y se desplaza hasta el primer punto de la escena que será analizado, cuyo valor se detallará posteriormente.

Los valores de  $T_{DWELL}$  y  $T_R$  para el beam en estudio son 0.0640 y 0.5057 segundos respectivamente.

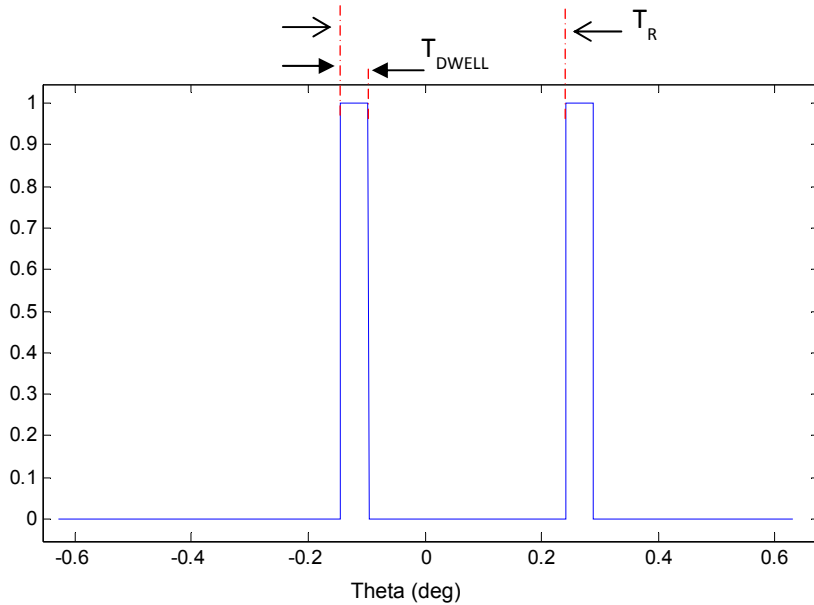


Fig. 3.19: tren de pulsos unitarios

El próximo paso consiste en definir los puntos inicial y final de la escena que será estudiada.

El punto inicial corresponde con el valor negativo de steering máximo sumándole la mitad del ancho de haz del diagrama de radiación,  $inicio = -steering\_max + \frac{bandwidth}{2}$ .

Para el caso en estudio el valor resultante es de -0.1459 grados.

El valor del punto final corresponde con el valor positivo de steering máximo al que se le resta el valor de la mitad del ancho de haz,  $final = steering\_max - \frac{bandwidth}{2}$ , o lo que es equivalente final es el mismo valor de inicio pero con signo inverso, 0.1482.

La diferencia entre ambos valores es debida al valor de resolución empleado y a la implementación del código en Matlab.

Estos valores que delimitan la escena en estudio deben cumplir la condición que todos los puntos analizados sean vistos por el mismo número de conmutaciones del diagrama de ganancia.

El próximo paso consiste en realizar las conmutaciones angulares del diagrama de ganancia. A las necesarias para cubrir el margen de steering marcado por *steering max* el programa añade a ambos lados de la escena un número de conmutaciones con diferentes funciones. Estos diagramas añadidos se reflejan gráficamente por usar color negro frente al rojo que se emplea en las conmutaciones reales. La motivación de estas conmutaciones extras sigue dos ideas:

La primera viene motivada por el hecho que a la hora de analizar un punto la primera muestra del pulso se alinea con dicho punto, por lo que los últimos puntos de la escena no verían el mismo número de conmutaciones que verían los primeros puntos, provocando así un incremento ficticio del scalloping ya que en la realidad, con el satélite orbitando, dichos puntos no producirían tal scalloping. La manera más sencilla y rápida de implementar este hecho en código Matlab es añadir dicho número de conmutaciones extras a partir de la última conmutación realizada en la parte positiva del steering. Dicho valor se puede calcular como la relación entre  $T_{DWELL}$  y el equivalente temporal de la variable *steer*, redondeando el resultado al entero superior:

$$\Delta CONM = \text{ceil}\left(\frac{T_{DWELL}}{STEER_{time}}\right) \quad (3.16)$$

Para el caso del beam en estudio  $STEER_{TIME}$  tiene un valor de 0.0105 segundos y  $\Delta CONM$  de 7.

El segundo valor de incremento de conmutaciones se debe a que al producirse un error de estimación del Doppler centroid existirían puntos en los extremos del swath que no serían vistos por el máximo de ganancia en el momento de observar la escena pero sí serían vistos por el máximo al analizar los swaths contiguos.

Para clarificar este hecho es más conveniente realizar la explicación con los siguientes ejemplos gráficos.

La siguiente figura muestra la escena analizada limitada por las líneas rojas punteadas con 4 conmutaciones. En este caso todos los puntos son vistos por el máximo de ganancia.

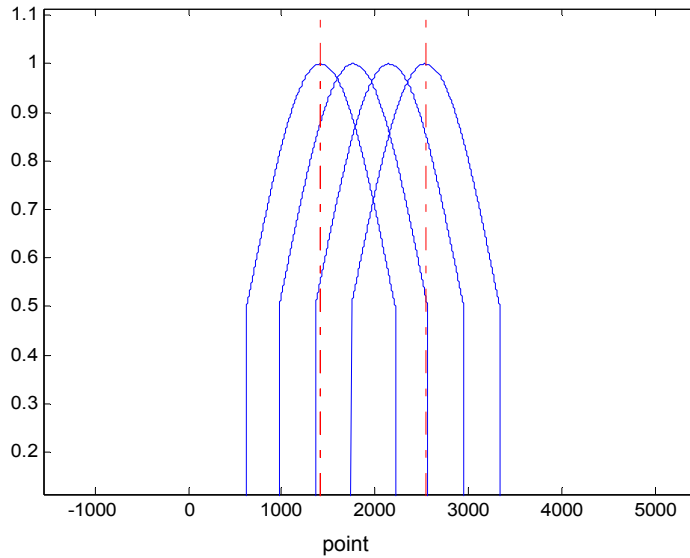


Fig. 3.20: ejemplo de conmutaciones en un swath sin error de Doppler centroid

La figura 3.21 muestra el efecto que produciría el error de Doppler centroid y se puede observar que los puntos finales de la escena, marcados por un círculo verde, no son vistos por el máximo de ganancia en este momento.

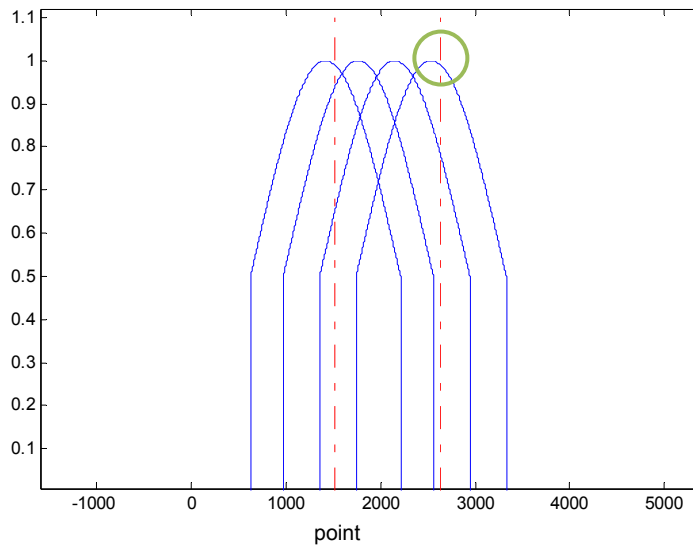


Fig. 3.21: ejemplo de conmutaciones en un swath con error de Doppler centroid

Sin embargo al pasar un tiempo de ciclo y analizar el swath contiguo en acimut estos puntos si serian vistos por el máximo de ganancia como puede observarse en la siguiente figura, en que se observan las conmutaciones que se realizarían en el subswath contiguo en forma de diagramas en línea discontinua de color verde.

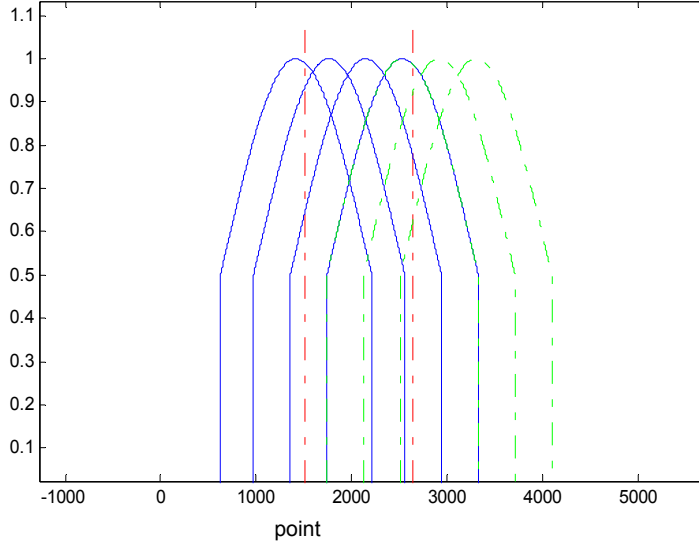


Fig. 3.22: ejemplo de conmutaciones en un swath y el contiguo en azimuth

Ya que el valor de error de Doppler centroid puede tener un valor positivo o negativo se deben añadir el mismo número de conmutaciones a ambos lados de la escena. El número de conmutaciones extra se calcula como la relación entre el error máximo, en este caso 150 Hz, y el valor de *steer*.

$$\Delta CONM_{MAXERROR} = \text{ceil}\left(\frac{\text{maximum error}}{STEER}\right) \cdot 2 \quad (3.17)$$

En el caso del beam seleccionado dicho valor es de 6, 3 conmutaciones a un lado y 3 al otro.

El próximo paso consiste en crear uno a uno cada diagrama con su steering definido por la función de steering real absoluto mostrada en la figura 3.18 en color verde y con el error de Doppler centroid seleccionado. Para ello se emplea un bucle y para cada valor de steering se realiza el siguiente cálculo:

$$G_i = \text{sinc}\left(\text{factor} \cdot \frac{L}{\lambda} \cdot \frac{V_b}{R} \cdot (\text{baseangular} + \text{centroiderror} - \text{steering}_i)\right) \quad (3.18)$$

Del resultado obtenido con la ecuación (3.16) se selecciona el diagrama de ganancia a -3 dB.

El resultado obtenido tras realizar todas las conmutaciones se puede observar en la siguiente figura (fig. 3.23), en la que los diagramas de color negro corresponden con los añadidos como se mencionó anteriormente en las ecuaciones (3.16) y (3.17).

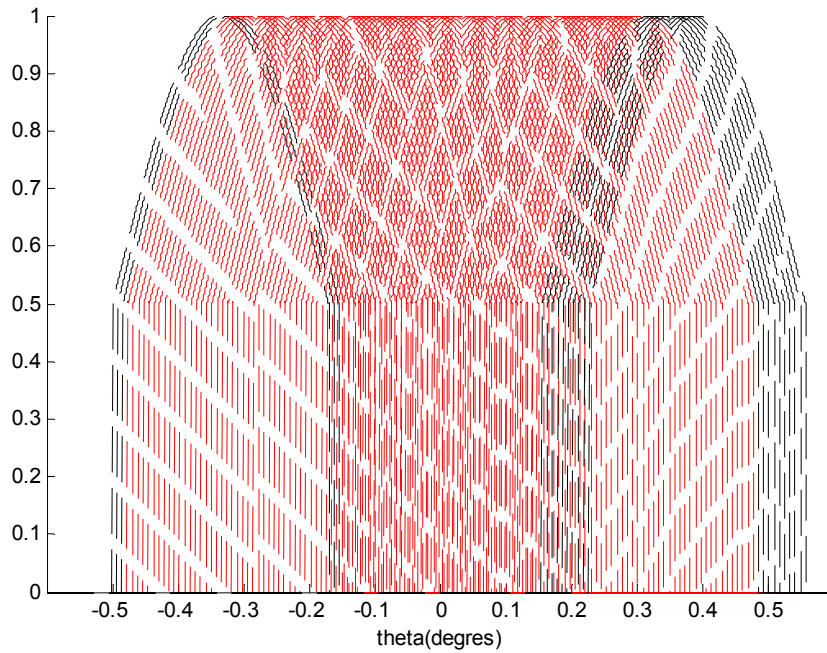


Fig. 3.23: conmutaciones de diagrama reales (rojo) y extras (negro)

Tras esto puede realizarse el solapamiento entre el tren de pulsos y los diagramas con su steering pertinente, pero queda el realizar la discriminación de pulso, la cual se realiza del mismo modo que en ScanSAR, quedándose el programa con el pulso que dentro del margen de puntos en estudio proporcione una mayor potencia como se puede observar en las gráficas 3.24 antes de la discriminación y en la 3.25 después.

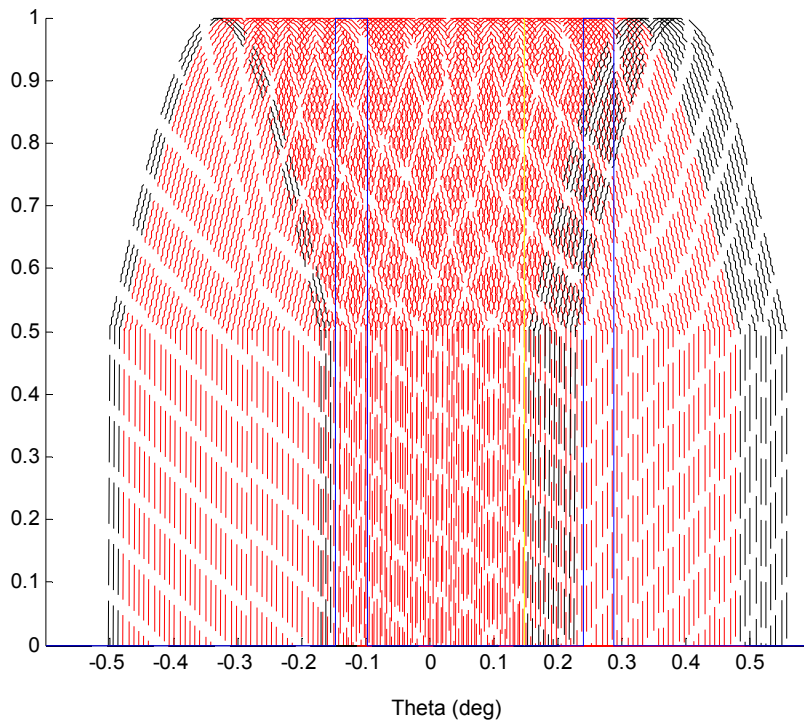


Fig. 3.24: solapamiento entre diagramas y pulsos antes de la discriminación

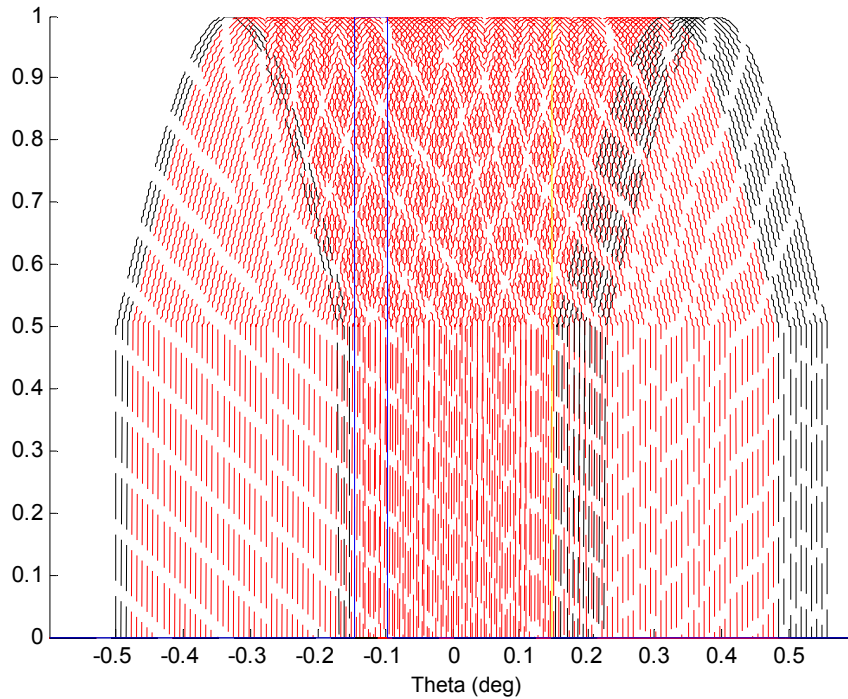


Fig. 3.25: solapamiento entre diagramas y pulsos después de la discriminación

Además, en las gráficas anteriores puede apreciarse en color amarillo las líneas que marcan el inicio y el final de la escena en estudio y que está comprendida entre  $-0.1459$  y  $0.1482$  grados.

### 3.3.3. Resultados obtenidos

Una vez seleccionado el pulso este se multiplica por cada uno de los diagramas de radiación y los resultados se suman, obteniendo así la potencia para cada punto. El resultado para el beam en estudio puede observarse en la siguiente figura para el caso en que el error de Doppler centroid sea 0.

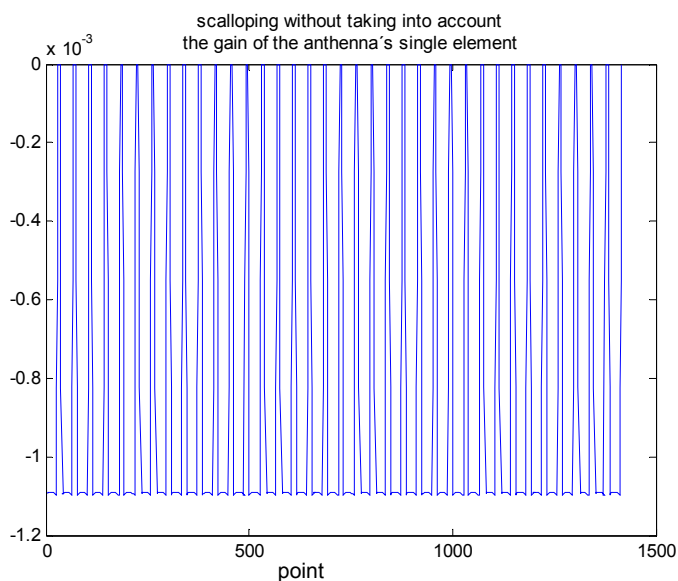
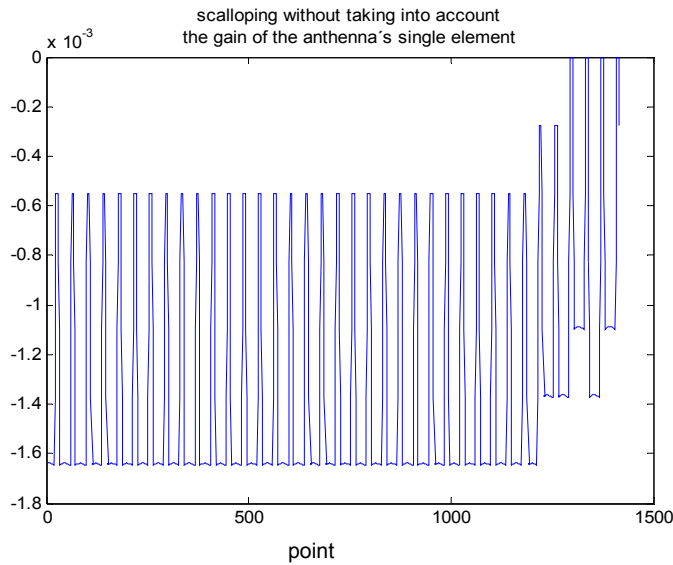


Fig. 3.26: perfil de scalloping TopSAR sin error de Doppler centroid

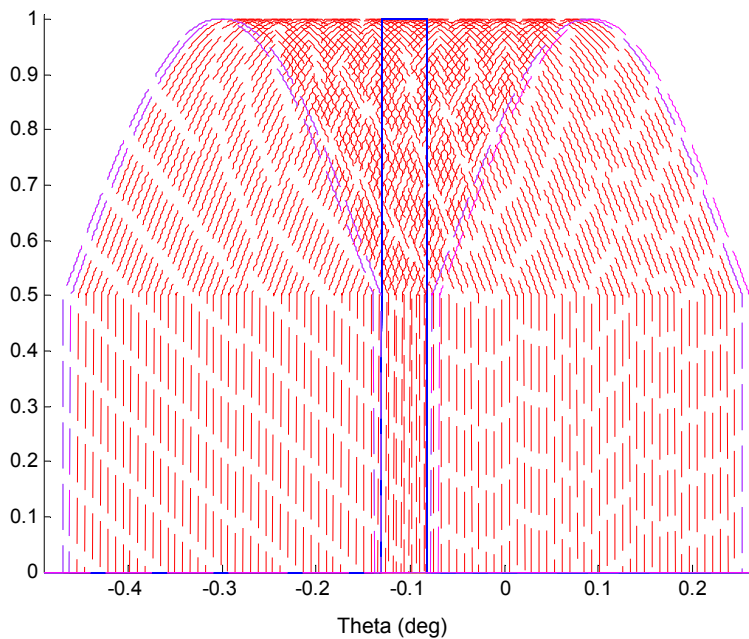
Mientras que para un error de -150 Hz se obtendría el resultado mostrado en la figura 3.27.



*Fig. 3.27: perfil de scalloping TopSAR con error de Doppler centroid máximo*

Remarcar que los valores de las gráficas anteriores están escalados por un valor de  $10^{-3}$  por lo que la variación entre ambas graficas puede considerarse nula.

Otro análisis que se puede realizar es fijar un punto concreto de la escena y obtener la ganancia equivalente con que sería visto dicho punto. En la siguiente figura se representa el resultado obtenido para un punto concreto. Los diagramas de color rojo son los diagramas que serían vistos por el punto y los diagramas en magenta son los que no. En total, para este caso, el punto sería visto un total de 47 veces.



*Fig. 3.28: conmutaciones vistas por un punto fijado, en color rojo*



La ganancia equivalente que resultaría si se integraran cada una de los diagramas sería el mostrado en la próxima figura.

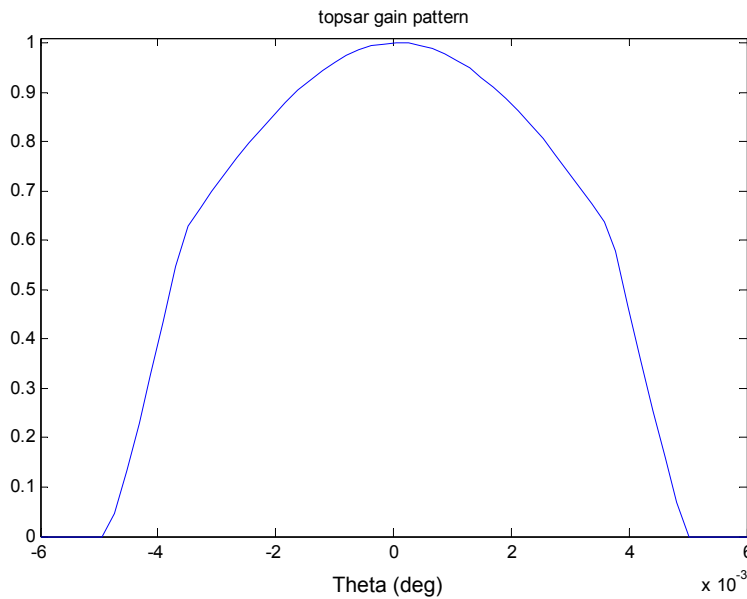


Fig. 3.29: diagrama equivalente TopSAR para un punto fijo

En la siguiente figura puede observarse una comparativa entre el diagrama de ganancia de ScanSAR y el equivalente de TopSAR tras realizar las conmutaciones. En TopSAR el ancho de haz se reduce aproximadamente en un factor 42.

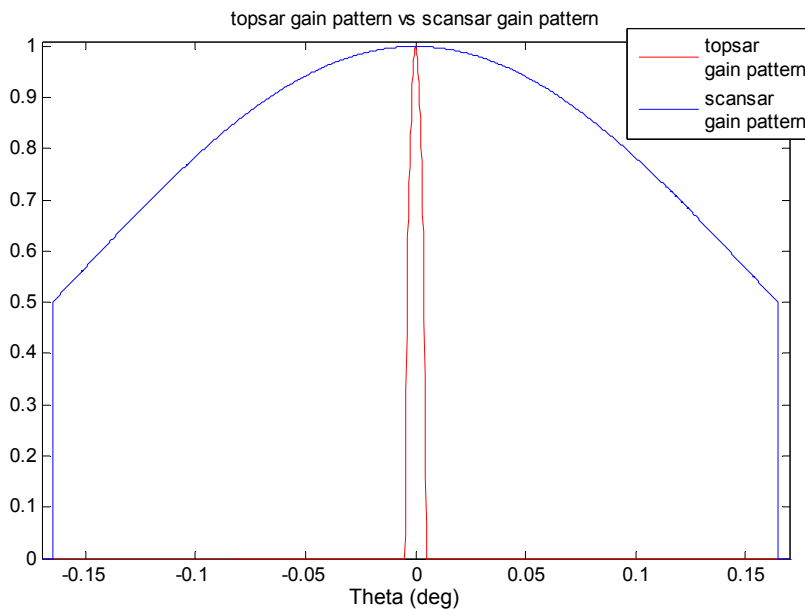


Fig. 3.30: diagrama de ganancia ScanSAR (azul) y TopSAR (rojo)

El diagrama anteriormente mostrado es para el caso en que el steering siguiera una aproximación de tipo escalera. En la siguiente gráfica, (3.31), se observa la comparación entre este caso y el caso en que siguiera una aproximación lineal

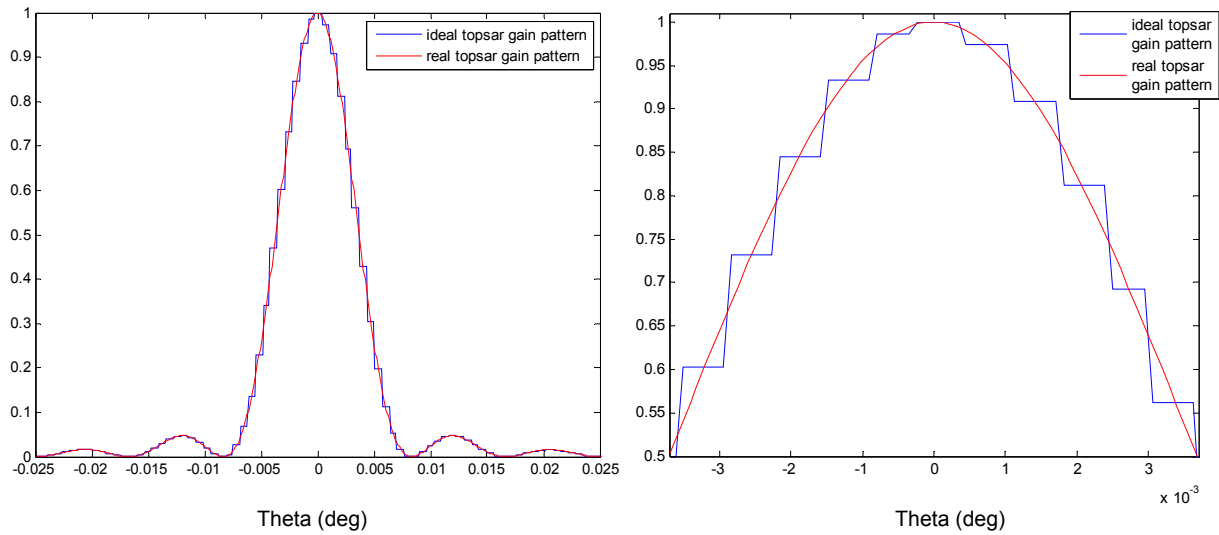


Fig. 3.31: diagrama equivalente TopSAR con steering ideal (rojo) y real (azul)

Una vez obtenido el perfil de scalloping para todos los puntos se puede extraer la profundidad de scalloping.

Para el caso de un error de 0 Hz en el beam en estudio la profundidad de scalloping tendría un valor de 0.00109 dB mientras que en el caso de que el error fuera de +150 Hz la profundidad de scalloping sería de 0.00164 dB.

El proceso anterior se repetiría para los distintos errores de Doppler centroid comprendidos entre -150 y 150 Hz, obteniendo para el caso del beam en estudio el resultado mostrado en la figura 3.32, cuyo valor de scalloping nunca supera los 0.0017 dB.

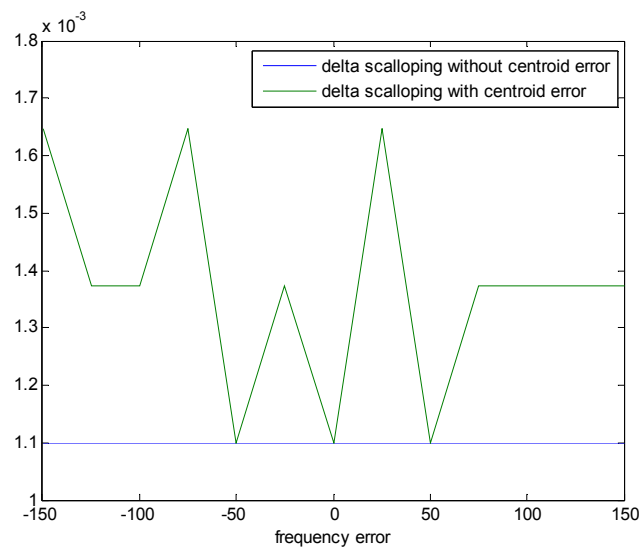


Fig. 3.32: profundidad de scalloping para errores de Doppler centroid entre -150 y 150 Hz

En estos resultados obtenidos no se ha tenido en cuenta que al realizar el steering, en la ganancia resultante también interviene el diagrama de radiación de un único

elemento del array, que es de un ancho de haz superior al equivalente de ScanSAR, por lo que la variación de ganancia será pequeña.

En el caso del beam en estudio, suponiendo que el diagrama del elemento único no tuviera un error de Doppler centroid pero que no se le realizara ninguna ponderación, la profundidad de scalloping aumentaría a 0.0149 dB, como se muestra en la siguiente figura.

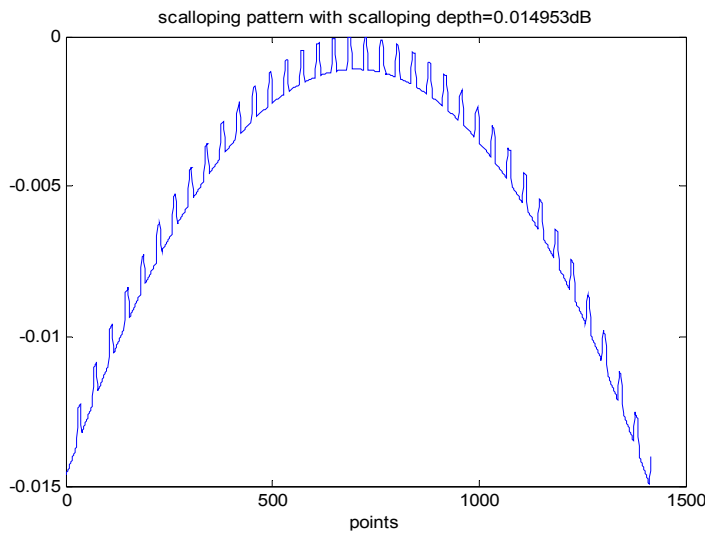


Fig. 3.33: perfil de scalloping sin error y teniendo en cuenta el elemento de array sin error de Doppler centroid

Si dicho diagrama tuviera un error de +150 Hz pero se realizara una ponderación inversa de acimut el scalloping residual tendría un valor de 0.0073 dB.

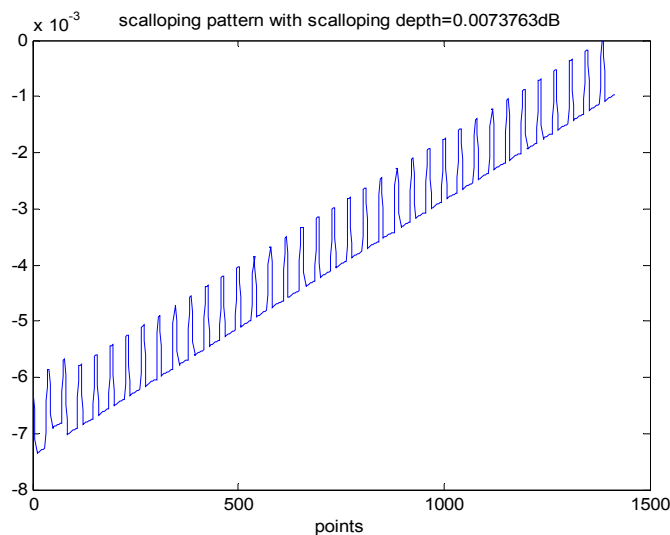


Fig. 3.34: perfil de scalloping con error y teniendo en cuenta el elemento de array con error de Doppler centroid

En la próxima sección se realizará un estudio de este efecto bajo diversas consideraciones o posibilidades, pero esta vez tomando los beams SM1 y SM22, que son el primer y último beam disponible en el modo TopSAR de Paz.

### **3.4. Efecto sobre el scalloping de la variación del ancho de haz del diagrama de 1 elemento**

#### **3.4.1. Introducción**

En un sistema radar real el diagrama de radiación de un único elemento de la agrupación se conoce a priori y no requiere una estimación del Doppler centroid. Además de esto el ancho de haz del diagrama no sufre de ninguna variación.

Sin embargo en este apartado se opta por no considerar como reales estos hechos para analizar cómo afectaría al cálculo del scalloping en TopSAR si se produjeran errores de Doppler centroid y si el ancho de haz se redujera por algún motivo. Para ello se han definido un total de 7 situaciones o escenarios en los cuales se definen el error de Doppler centroid y la anchura de haz del diagrama del elemento de la agrupación, además de considerar si se pondera o no mediante una ponderación inversa de la ganancia en acimut de este diagrama.

Para más detalle se aconseja revisar los anexos 6 y 7.

#### **3.4.2. Definición de escenarios en estudio**

Los diferentes escenarios son los siguientes para los beams SM1 y SM22:

##### **Escenario1**

El diagrama del elemento único no tiene error de Doppler centroid.

No se realiza ponderación del diagrama del elemento único.

Anchura de haz del elemento único con valores de 1.5°,2°,3°,4°

##### **Escenario 2**

El diagrama del elemento único tiene un error de Doppler centroid variable e igual al que tiene los diagramas de ScanSAR.

Sí se realiza ponderación inversa del diagrama del elemento único en acimut.

Anchura de haz del elemento único con valores de 1.5°,2°,3°,4°

##### **Escenario 3**

El diagrama del elemento único tiene un error de Doppler centroid variable e igual al que tiene los diagramas de ScanSAR.

No se realiza ponderación del diagrama del elemento único.

Anchura de haz del elemento único con valores de 1.5°,2°,3°,4°

#### Escenario 4

El diagrama del elemento único tiene un error de Doppler centroid fijo de -150 Hz.

No se realiza ponderación inversa del diagrama del elemento único en acimut.

Anchura de haz del elemento único con valores de 1.5°, 2°, 3°, 4°

#### Escenario 5

El diagrama del elemento único tiene un error de Doppler centroid fijo de +150 Hz

No se realiza ponderación inversa del diagrama del elemento único en acimut.

Anchura de haz del elemento único con valores de 1.5°, 2°, 3°, 4°

#### Escenario 6

El diagrama del elemento único tiene un error de Doppler centroid fijo de -150 Hz.

Sí se realiza ponderación inversa del diagrama de dicho elemento en acimut.

Anchura de haz del elemento único con valores de 1.5°, 2°, 3°, 4°

#### Escenario 7

El diagrama del elemento único tiene un error de Doppler centroid fijo de +150 Hz

Sí se realiza ponderación inversa del diagrama del elemento único en acimut.

Anchura de haz del elemento único con valores de 1.5°, 2°, 3°, 4°

En los anexos 6 y 7 se incluyen tanto los resultados numéricos como su representación gráfica, por lo que para hacer más ligera esta sección se prescindirá de una evaluación grafica de ellos.

### **3.4.3. Resultados obtenidos en el beam SM1**

Para el escenario 1 los valores máximos de profundidad de scalloping se producen con un error de -100 Hz y tienen un valor de 0.109 dB para 1.5°, 0.0622 dB para 2°, 0.0282 dB para 3° y 0.0163 dB para 4°.

Para el escenario 2 los valores de profundidad de scalloping máxima se produce con un error de -150 Hz y tienen un valor de 0.0507 dB para 1.5°, 0.0288 dB para 2°, 0.0134 dB para 3° y 0.00808 dB para 4°.

Para el escenario 3 los valores de profundidad de scalloping máxima se produce con un error de +150 Hz y tienen un valor de 0.0196 dB para 1.5°, 0.135 dB para 2°, 0.0764 dB para 3° y 0.0343 dB para 4°.

Para el escenario 4 los valores máximos de profundidad de scalloping se producen con un error de +50 Hz y tienen un valor de 0.134 dB para 1.5°, 0.0759 dB para 2°, 0.0343 dB para 3° y 0.0197 dB para 4°.

Para el escenario 5 los valores máximos de profundidad de scalloping se producen con un error de +125 Hz con un valor de 0.136 dB para 1.5°, 0.0770 dB para 2°, para -100 Hz con un valor de 0.0347 dB para 3° y para +75 Hz con un valor de 0.0200 dB para 4°.

Para el escenario 6 los valores de profundidad de scalloping máximo se producen con un error de -50 Hz con un valor de 0.0513 dB para 1.5°, 0.0291 dB para 2°, con un error de +50 Hz y un valor de 0.0135 dB para 3° y para -150 Hz con un valor de 0.0080 dB para 4°.

Para el escenario 7 los valores de profundidad de scalloping máximos se producen con un error de 125 Hz con un valor de 0.0512 dB para 1.5° y 0.0291 dB para 2°, para un error de -125 Hz con un valor de 0.0134 dB para 3° y 0.0080 dB para 4°.

	Escenario 1		Escenario 2		Escenario 3		Escenario 4	
Width	frec error	Scalloping	frec error	Scalloping	frec error	Scalloping	frec error	Scalloping
1.5	-100	0.1097	-150	0.0507	150	0.0196	50	0.1345
2	-100	0.0622	-150	0.0288	150	0.1358	50	0.0759
3	-100	0.0282	-150	0.0134	150	0.0764	50	0.0343
4	-100	0.0163	-150	0.0080	150	0.0343	50	0.0197
	Escenario 5		Escenario 6		Escenario 7			
Width	frec error	Scalloping	frec error	Scalloping	frec error	Scalloping		
1.5	125	0.1363	-50	0.0513	125	0.0512		
2	125	0.0770	-50	0.0291	125	0.0291		
3	75	0.0347	50	0.0135	-125	0.0134		
4	-100	0.0200	-150	0.0080	-125	0.0080		

Tabla 3.2: Resultados de profundidad de scalloping para beam SM1 según escenarios

#### **3.4.4. Resultados obtenidos en el beam SM22**

Para el escenario 1 los valores máximos de profundidad de scalloping se producen con un error de 0 Hz y tienen un valor de 0.0964 dB para 1.5°, 0.0550 dB para 2°, 0.0254 dB para 3° y 0.0151 dB para 4°.

Para el escenario 2 los valores máximos de profundidad de scalloping se producen con un error de +150 Hz y tienen un valor de 0.0478 dB para 1.5°, 0.0275 dB para 2°, 0.0131 dB para 3°, y para -150 Hz con un valor de 0.0081 dB para 4°.

Para el escenario 3 los valores máximos de profundidad de scalloping se producen con un error de 150 Hz y tienen un valor de 0.120 dB para 1.5°, 0.0679 dB para 2°, 0.0310 dB para 3° y 0.0182 dB para 4°.

Para el escenario 4 los valores máximos de profundidad de scalloping se producen con un error de 125 Hz y tienen un valor de 0.113 dB para 1.5°, 0.0647 dB para 2°, y para +50 Hz 0.0298 dB para 3° y 0.0176 dB para 4°.

Para el escenario 5 los valores máximos de profundidad de scalloping se producen con un error de 0 Hz y tienen un valor de 0.121 dB para 1.5°, 0.0691 dB para 2°, 0.0317 dB para 3° y 0.0186 dB para 4°.

Para el escenario 6 los valores máximos de profundidad de scalloping se producen con un error de 50 Hz y tienen un valor de 0.0483 dB para 1.5°, 0.0280 dB para 2°, 0.0135 dB para 3° y 0.0085 dB para 4°.

Para el escenario 7 los valores máximos de profundidad de scalloping se producen con un error de 0 Hz y tienen un valor de 0.0482 dB para 1.5°, 0.0278 dB para 2°, 0.0134 dB para 3° y 0.0083 dB para 4°.

	Escenario 1		Escenario 2		Escenario 3		Escenario 4	
Width	frec error	Scalloping	frec error	Scalloping	frec error	Scalloping	frec error	Scalloping
1.5	0	0.0964	150	0.04783	150	0.1203	125	0.1138
2	0	0.0550	150	0.02757	150	0.0679	125	0.0647
3	0	0.0254	150	0.01314	150	0.0310	50	0.0298
4	0	0.0151	-150	0.00814	150	0.0182	50	0.0176
	Escenario 5		Escenario 6		Escenario 7			
Width	frec error	Scalloping	frec error	Scalloping	frec error	Scalloping		
1.5	0	0.1215	50	0.0483	0	0.0482		
2	0	0.0691	50	0.0280	0	0.0278		
3	0	0.0317	50	0.0135	0	0.0134		
4	0	0.0186	50	0.0085	0	0.0083		

Tabla 3.3: Resultados de profundidad de scalloping para beam SM22 según escenarios

Como resumen, en ninguno de los escenarios estudiados el scalloping supera los 0.13 dB y se produce con un ancho de haz de 1.5°. Aunque hay que tener en cuenta que los valores reales de ancho de haz del diagrama de ganancia del único elemento están

comprendidos entre 4.0947, para el beam SM1, y 6.5133 grados, para el beam SM22, por lo que las situaciones propuestas anteriormente en que el ancho de haz era inferior a 4° distarían mucho de la realidad y podría considerarse que la situación con 4° de ancho de haz como la más cercana a la realidad. Las gráficas de los diagramas de ganancia de estos beams pueden observarse en las figuras 3.35, 3.36 y 3.37.

Observando las tablas 3.2 y 3.3 anteriores se puede observar que los valores mínimos de scalloping que producen para el beam SM1 en el escenario 7 mientras que para el beam SM22 para el escenario 2, de lo que se puede concluir que la mejor opción, sea cual sea el error de Doppler centroid de la ganancia del elemento de antena, es la de realizar una ponderación de inverso de ganancia de este.

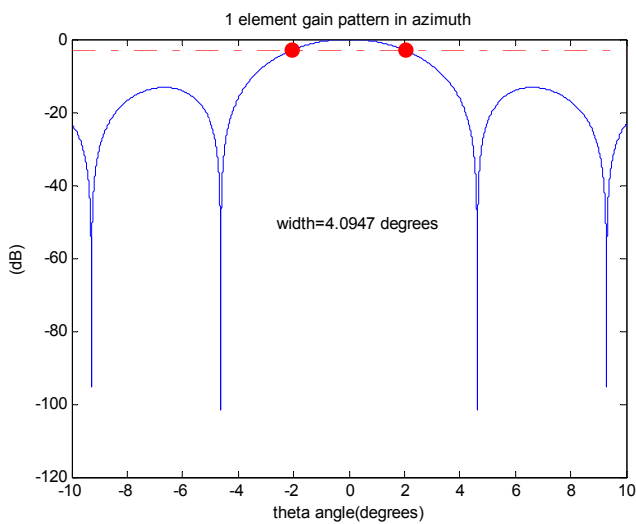


Fig. 3.35: diagrama de ganancia del elemento único del array para el beam SM1

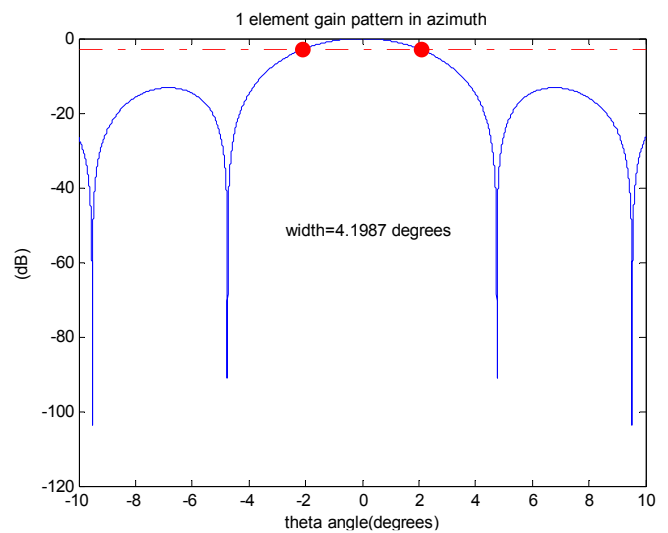


Fig. 3.36: diagrama de ganancia del elemento único del array para el beam SM3

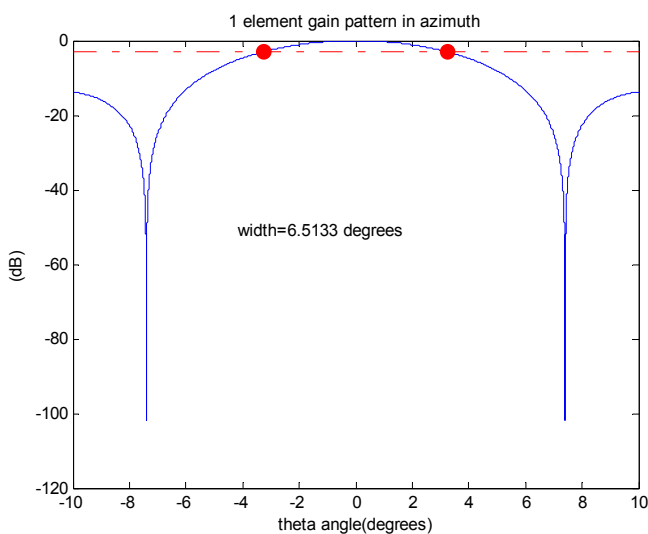


Fig. 3.37: diagrama de ganancia del elemento único del array para el beam SM22



### **3.5. Referencias**

[3.1]: “Topsar: terrain observation by progressive scan”, Francesco De Zan, Andrea Monti Guarnieri

[3.2]: “TOPS Imaging With TerraSAR-X: Mode Design and Performance Analysis”, Adriano Meta, Josef Mittermayer, Pau Prats, Rolf Scheiber, Ulrich Steinbrecher

[3.3]: “Analysis and evaluation of Terrain Observation by Progressive Scans (TOPSAR) mode in Synthetic Aperture Radar”; Josep Ruiz Rodon; Antoni Broquetas Ibars; ETSETB-UPC

[3.4]: “Antenna Model,SAR Mission Paz”; José M<sup>a</sup> González Arbesú, Irena Calafell Rueda, Jordi Romeu Robert

# **Capítulo 4**

## **Comparación entre los modos** **ScanSAR y TopSAR en** **Paz y TerraSAR-X**

#### **4.1. Introducción**

En los capítulos 2 y 3 se ha descrito el efecto radiométrico scalloping y se ha cuantificado su valor en los modos de exploración ScanSAR y TopSAR.

Para el modo ScanSAR se ha realizado el estudio en los satélites Paz, Radarsat y Envisat mientras que para el modo TopSAR se ha limitado a Paz. En concreto en Paz se ha seleccionado el beam SM3 del modo SC2.

En este capítulo se realizará una comparación de los resultados obtenidos entre ScanSAR y TopSAR pero limitándose al satélite Paz, del cual se selecciona en este caso el beam SM22 del modo SC6 para no repetir resultados ya expresados anteriormente y aportar información nueva.

Primero de todo se realiza una comparación del beam SM22 para posteriormente realizar la comparación de todos los beams disponibles en conjunto, que van del SM1 al SM22 ya que la información empleada en el modo TopSAR se limita a este conjunto de beams, aun cuando para el modo ScanSAR los beams disponibles van del SM1 al SM26.

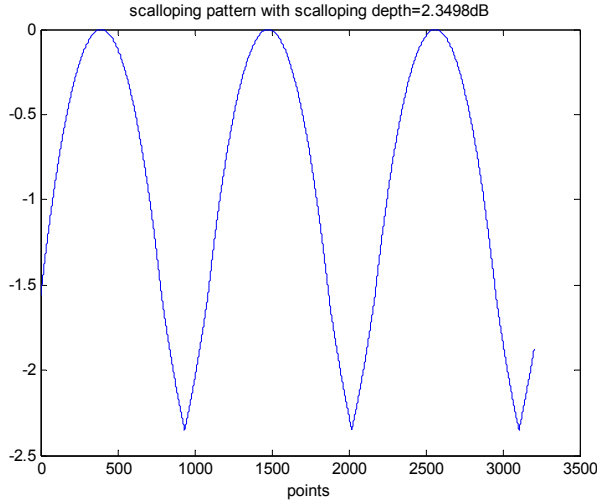
Para finalizar el capítulo se realiza una comparativa mediante imágenes reales tomadas con TerraSAR-X.

#### **4.2. Comparativa para el beam SM22 de Paz**

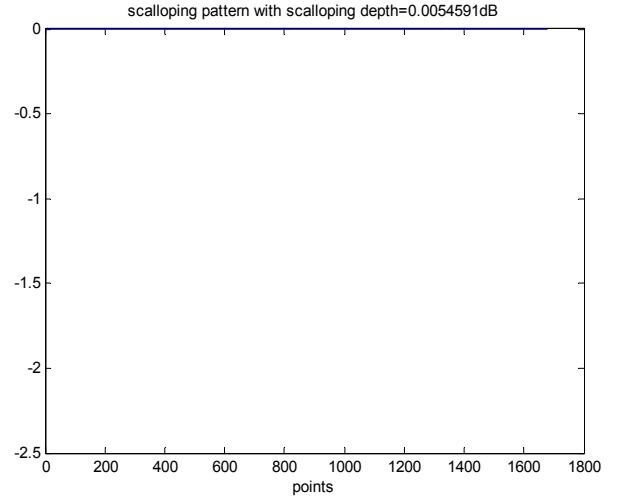
Las siguientes figuras muestran los diversos resultados obtenidos correspondiéndose las figuras de la izquierda al modo ScanSAR y las de la derecha al modo TopSAR.

Las gráficas de resultados correspondientes a TopSAR se han configurado de manera que empleen la misma escala que las gráficas correspondientes a ScanSAR de manera que la comparación entre ambas sea más sencilla y rápida de realizar.

En las figuras 4.1 y 4.2 se observa el perfil de scalloping sin error de Doppler centroid en dicho beam con ponderación rectangular para ScanSAR y TopSAR. Se puede observar cómo mientras que en el modo ScanSAR el scalloping va de los 0 dB a los 2.34 dB en el modo TopSAR el scalloping vale prácticamente 0 para todos los puntos

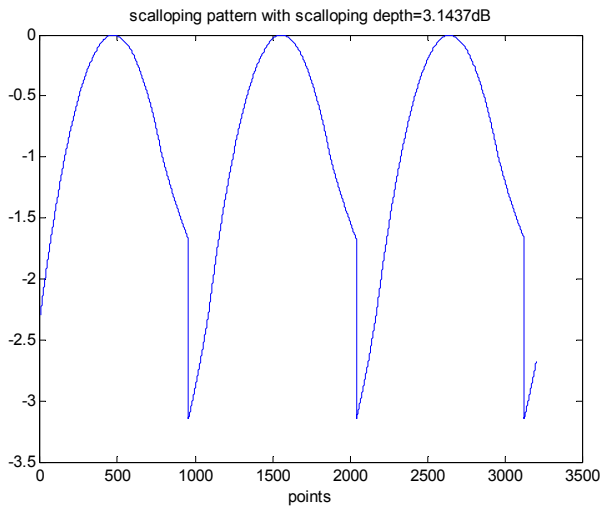


*Fig. 4.1: perfil de scalloping, modo ScanSAR  
modo SC6, beam SM22  
ponderación Rectangular  
error Doppler 0 Hz*

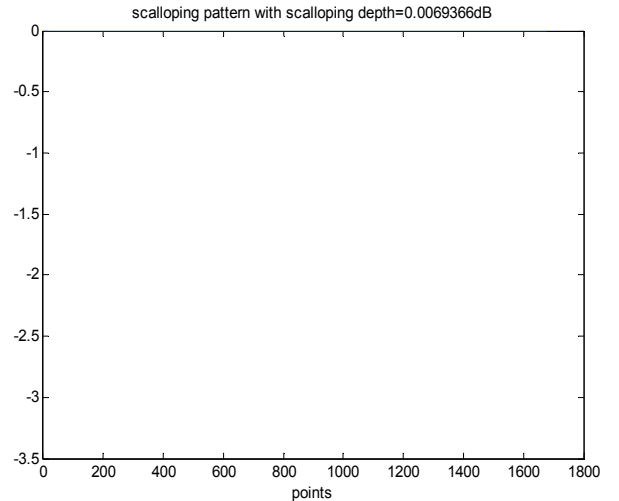


*Fig. 4.2: perfil de scalloping, modo TopSAR  
modo SC6, beam SM22  
ponderación Rectangular  
ponderación 1 elemento Rectangular  
error 1 elemento 0 Hz*

En las figuras 4.4 y 4.5 se observa el perfil de scalloping para un error de +150 Hz y una ponderación rectangular. Mientras que en ScanSAR el scalloping máximo ha aumentado hasta los 3.14 dB en el caso de TopSAR el scalloping sigue manteniéndose en un valor de prácticamente 0 dB.



*Fig. 4.3: perfil de scalloping, modo ScanSAR  
modo SC6, beam SM22  
ponderación Rectangular  
error Doppler +150 Hz*



*Fig. 4.4: perfil de scalloping, modo TopSAR,  
modo SC6, beam SM22  
ponderación Rectangular  
ponderación 1 elemento Rectangular  
error 1 elemento +150 Hz*

En la figura 4.5 y 4.6 se observa el perfil de scalloping empleando ponderación inversa de ganancia en acimut y sin error de Doppler centroid. En este caso el valor de scalloping es prácticamente 0 en ambos modos.

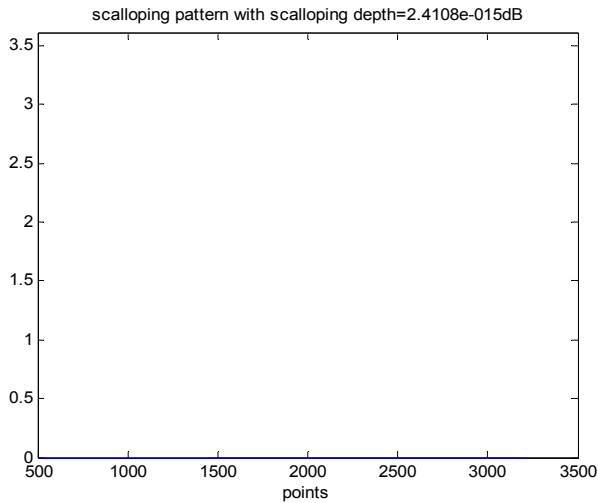


Fig. 4.5: perfil de scalloping, modo ScanSAR  
modo SC6, beam SM22  
ponderación Inversa  
error Doppler 0 Hz

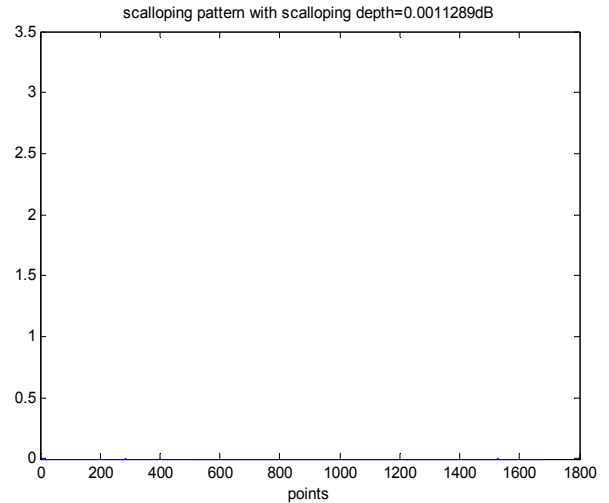


Fig. 4.6: perfil de scalloping, modo TopSAR  
modo SC6, beam SM22  
ponderación Rectangular  
ponderación 1 elemento Inversa  
error 1 elemento 0 Hz

En la figura 4.7 y 4.8 se observa el perfil de scalloping con ponderación inversa y +150 Hz de error de Doppler centroid. En el modo ScanSAR el valor de scalloping va desde 0 a 1.67 dB mientras que en TopSAR sigue obteniéndose un valor de 0 dB.

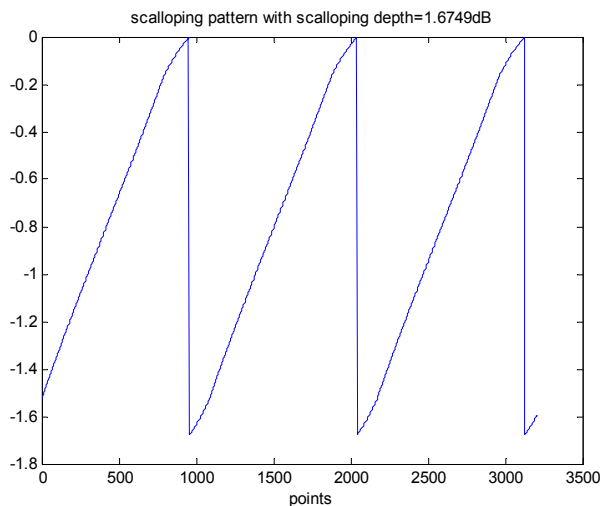


Fig. 4.7: perfil de scalloping, modo ScanSAR  
modo SC6, beam SM22  
ponderación Inversa  
error Doppler +150 Hz

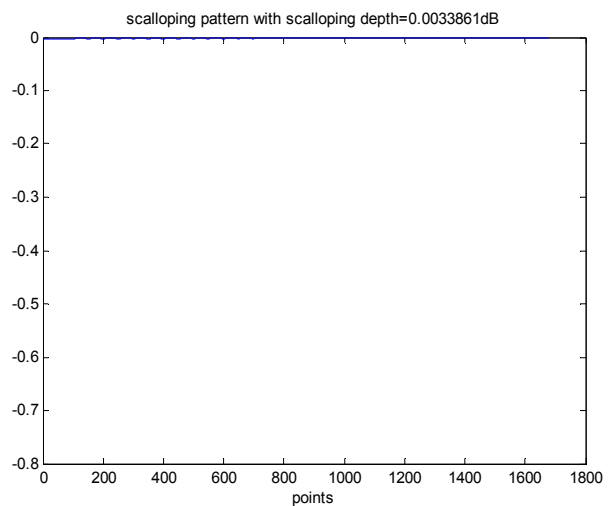


Fig. 4.8: perfil de scalloping, modo TopSAR  
modo SC6, beam SM22  
ponderación Rectangular  
ponderación 1 elemento Inversa  
error Doppler +150 Hz

Las figuras 4.9, 4.10, 4.11 y 4.12 representan los valores de profundidad de scalloping, o scalloping máximo, para distintos errores de Doppler centroid. En ellas se observa que si no se realiza ninguna ponderación (4.9 y 4.10) la profundidad de scalloping en ScanSAR va desde los 2,349 dB para un error de 0 Hz hasta 3,143 dB con un error de +150 Hz, mientras que en TopSAR se obtiene un valor constante y cero.

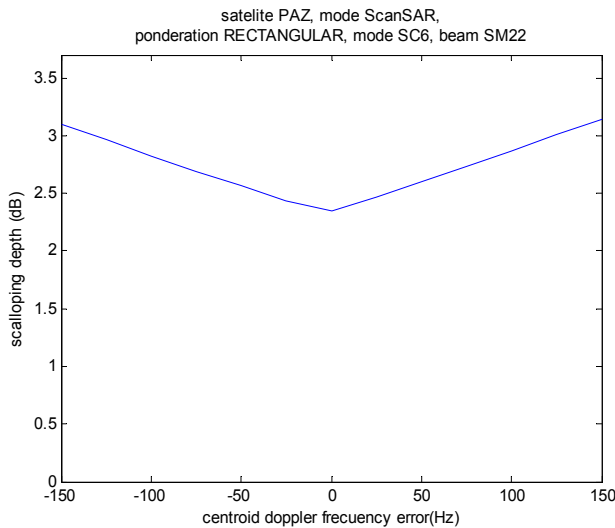


Fig. 4.9: perfil de scalloping, modo ScanSAR, modo SC6, beam SM22 ponderación Rectangular

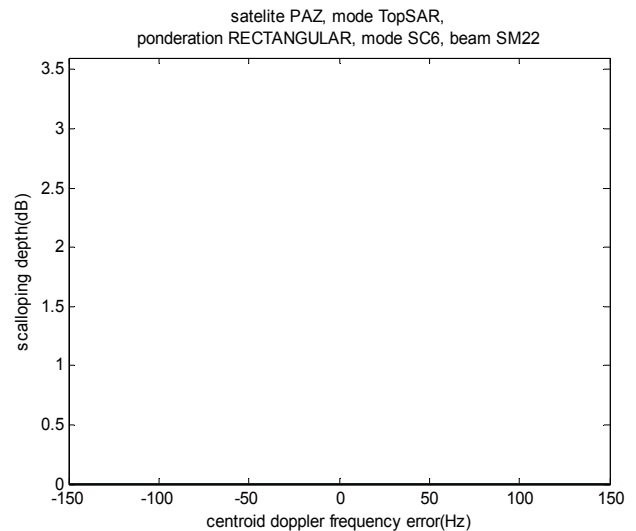


Fig. 4.10: perfil de scalloping, modo TopSAR, modo SC6, beam SM22 ponderación Rectangular ponderación 1 elemento Rectangular

Mientras que en el caso de realizar ponderación inversa de acimut los valores de scalloping en ScanSAR van desde los 0 dB para un error de 0 Hz hasta los 1.67 dB para +150 Hz, mientras que en TopSAR se obtiene un valor de 0 dB para cualquier error de Doppler centroid.

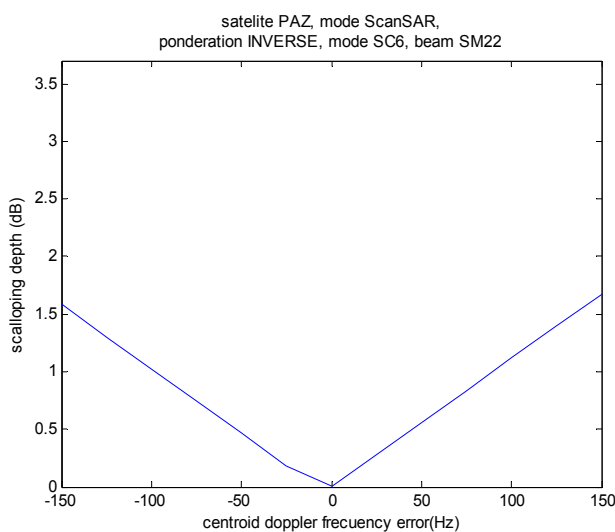


Fig. 4.11: perfil de scalloping, modo ScanSAR modo SC6, beam SM22 ponderación Inversa

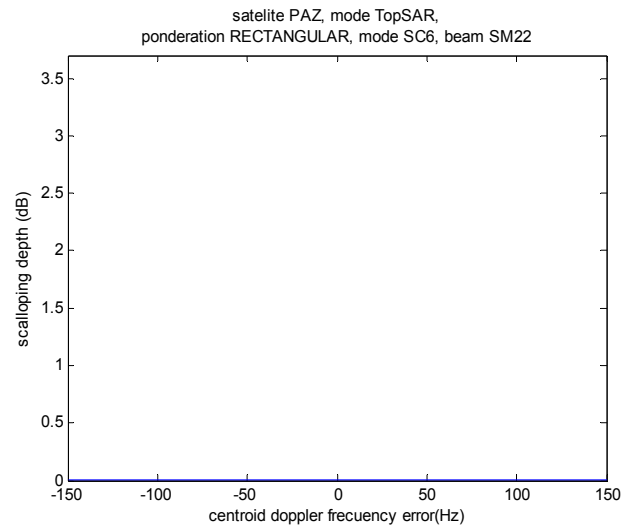


Fig. 4.12: perfil de scalloping, modo TopSAR modo SC6, beam SM22 ponderación Rectangular ponderación 1 elemento Inversa

### 4.3. Comparativa para todos los beams de Paz

En las próximas graficas se comparan todos los beams disponibles desde el SM1 hasta el SM22.

Para ponderación rectangular en modo ScanSAR los valores de profundidad de scalloping máximo van desde los 1.31 dB hasta los 3.66 dB mientras que en TopSAR el valor de profundidad de scalloping tiene un valor de 0 dB para cualquier error de frecuencia Doppler del centroid como se observa en las gráficas 4.13 y 4.14.

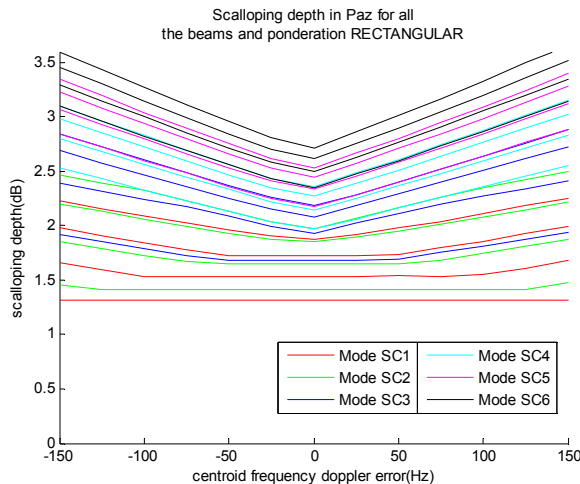


Fig. 4.13: profundidad de scalloping, modo ScanSAR  
Todos los modos, todos los beams  
ponderación Rectangular

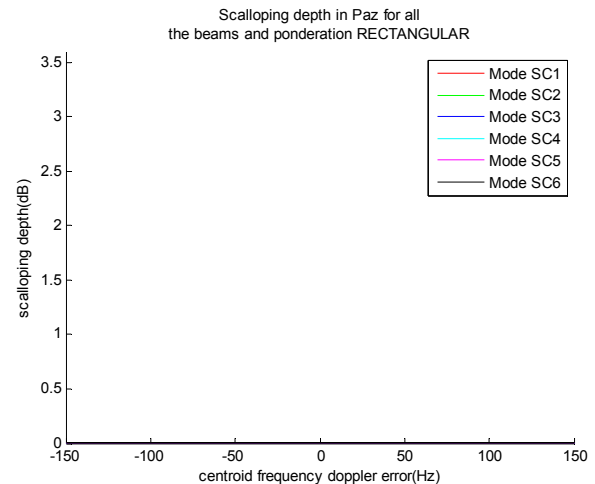


Fig. 4.14: profundidad de scalloping, modo TopSAR  
Todos los modos, todos los beams  
ponderación Rectangular  
ponderación 1 elemento Rectangular

En las gráficas 4.15 y 4.16 se observa que realizando una ponderación inversa en el modo ScanSAR los valores de profundidad de scalloping máximo van de 1.15 dB hasta 1.81 dB y en TopSAR se obtienen 0 dB para cualquier error de Doppler centroid.

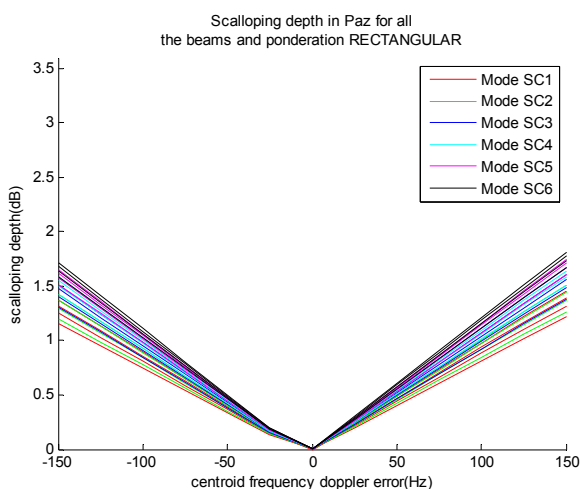


Fig. 4.15: profundidad de scalloping, modo ScanSAR  
Todos los modos, todos los beams  
ponderación Inversa

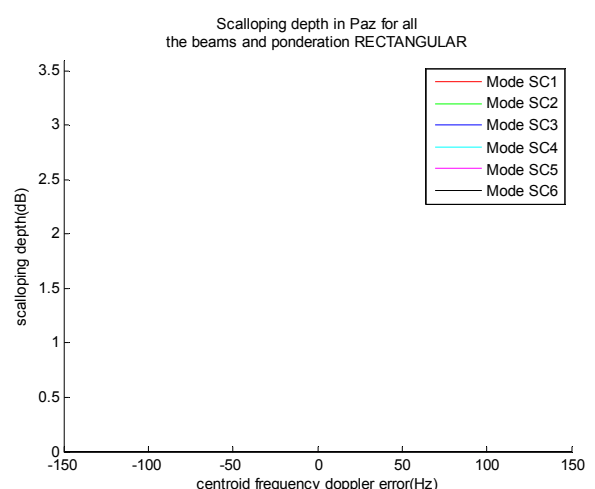


Fig. 4.16: profundidad de scalloping, modo TopSAR  
Todos los modos, todos los beams  
ponderación Rectangular  
ponderación 1 elemento Inversa

#### **4.4. Comparativa mediante imágenes de TerraSAR-X**

En esta sección se muestran capturas tomadas con TerraSAR-X en los modos ScanSAR, TopSAR y TopSAR Inverso.

Las 2 primeras imágenes se tomaron en el área de Toulouse, Francia. La primera se tomó en TopSAR y la segunda con TopSAR Inverso.

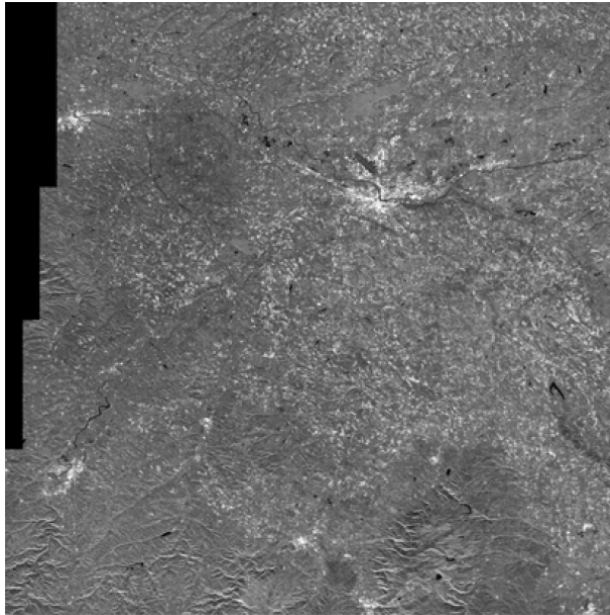


Fig. 4.17:  
Imagen TopSAR tomada por  
TerraSAR-X sobre Toulouse

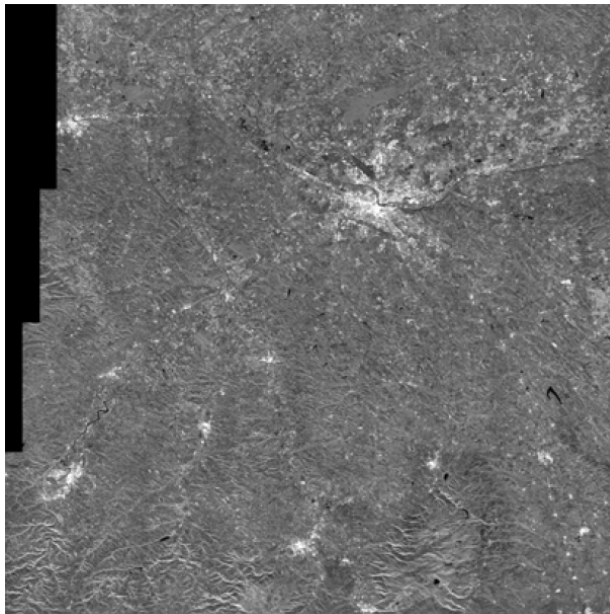


Fig. 4.18:  
Imagen Inverse TopSAR tomada por  
TerraSAR-X sobre Toulouse

En la primera imagen con TopSAR el efecto del scalloping es casi imperceptible mientras que en la segunda con Inverse TopSAR se puede apreciar un ligero scalloping en los bordes de los swaths debido a un mayor valor de la tasa de ángulo de steering como se detalló en el capítulo 3, página 69 y página 73 ecuación (3.10).



Las próximas tres imágenes pertenecen también a Toulouse pero en este caso se tomaron en modo TopSAR (4.19), TopSAR inverso (4.20) y ScanSAR (4.21). En las imágenes se observa el primer subswaths de los 4 disponibles en range.

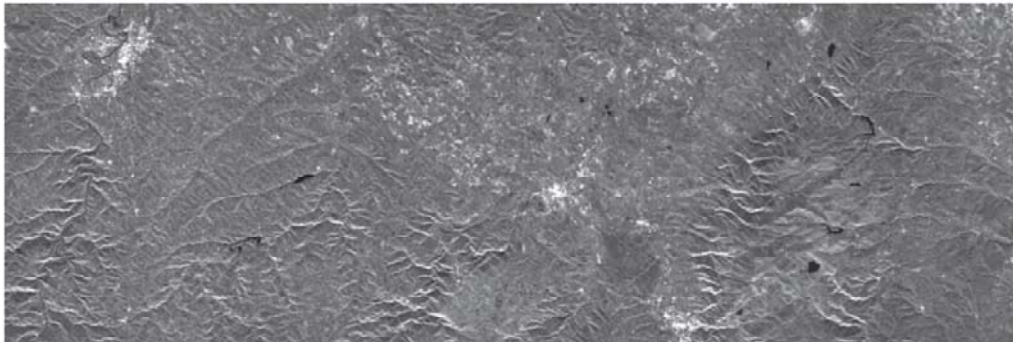


Fig. 4.19:  
Imagen TopSAR tomada por TerraSAR-X sobre Toulouse

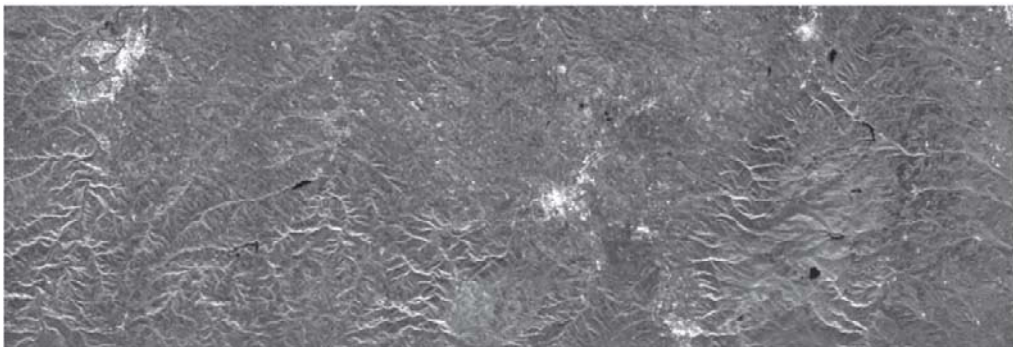


Fig. 4.20:  
Imagen Inverse TopSAR tomada por TerraSAR-X sobre Toulouse

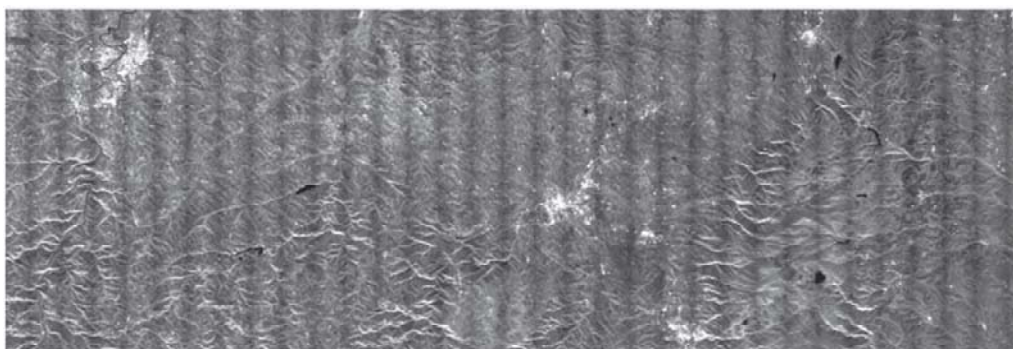


Fig. 4.21:  
Imagen ScanSAR tomada por TerraSAR-X sobre Toulouse

En este caso el valor de scalloping residual medido en la primera imagen era de 0.3 dB y en la segunda de 0.7 dB, valores que en la imagen apenas se pueden apreciar, mientras que en la tercera era de 1.2 dB, valor que es claramente visible.

Para finalizar se muestran 3 imágenes que corresponden a la zona de Challans, Francia.

La primera de ellas corresponde al sistema Google Maps.



Fig. 4.22:  
Imagen de Challans de  
Google Maps

La segunda fue tomada por TerraSAR-X en modo TopSAR.

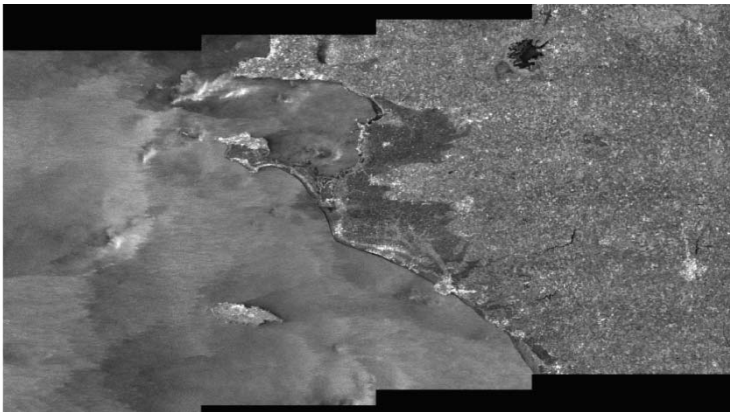


Fig. 4.23:  
Imagen de Challans tomada  
por TerraSAR-X en TopSAR  
el 9 de Julio de 2007

La tercera fue tomada también con TerraSAR-X pero en modo ScanSAR realizando todas las correcciones radiométricas posibles, incluyendo corrección de scalloping mediante ponderación inversa y un estimador de frecuencia Doppler de alta precisión.



Fig. 4.24:  
Imagen de Challans tomada  
por TerraSAR-X en ScanSAR  
el 2 de Sept. de 2007

Mientras que en la segunda imagen se observa que el scalloping apenas está presente, en la tercera imagen en el área terrestre no se aprecia scalloping pero en el área oceánica sí se observa la presencia de scalloping en los bordes de las swaths.

#### 4.5. Efecto del steering en el número de ráfagas necesarias

Otro punto no mencionado hasta este capítulo debido a que no tiene trascendencia en el cálculo del scalloping es el hecho que el margen angular con que se observa una zona de terreno varía de ScanSAR a TopSAR.

Cuando el radar trabaja con el modo de exploración ScanSAR el área observada por el radar viene marcada por el margen angular del diagrama de radiación de antena, típicamente alrededor de 0.3 grados, mientras que cuando el radar trabaja en modo TopSAR este margen angular lo marca la variación angular máxima, como puede observarse en la figura 4.25.

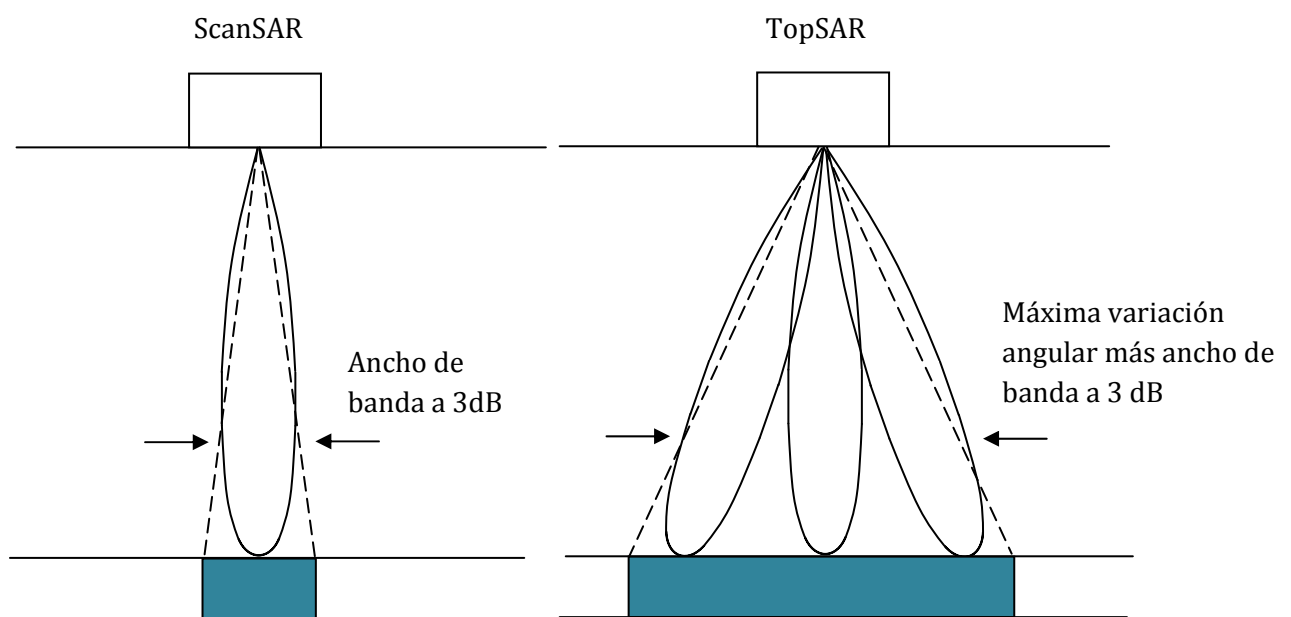


Fig. 4.25: Efecto de la conmutación angular en el margen angular de TopSAR frente al de ScanSAR

Para el caso de TerraSAR-X (TSX) el ancho de haz de ScanSAR es de unos  $0.33^\circ$ , mientras que la variación angular máxima empleada en TopSAR es de  $\pm 0.44^\circ$ . Si a la variación angular de TopSAR se le suma el ancho de haz a 3 dB ( $0.44 \times 2 + 0.33$ ), la variación angular es de  $1.21^\circ$ , que relacionado con el ancho de haz de ScanSAR da una relación 33 a 9.

Esta relación significa que para cubrir el mismo área en ScanSAR se requieren 33 ráfagas en acimut mientras que en TopSAR se requieren 9, como puede observarse en la siguiente representación.



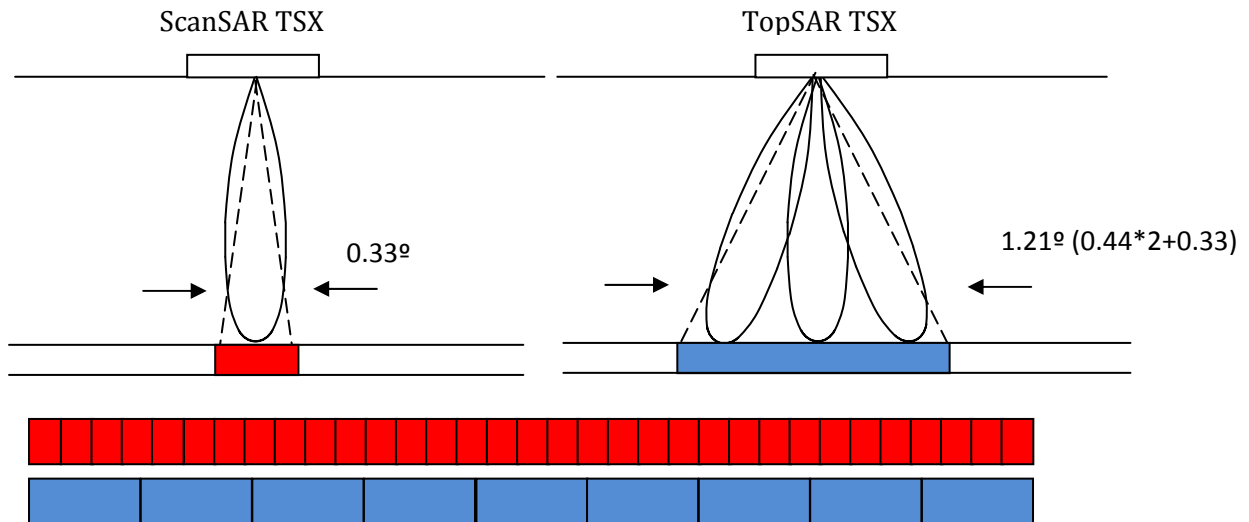


Fig. 4.26: Numero de ráfagas necesarias en ScanSAR (rojo o arriba) frente TopSAR (azul o debajo)

Como ejemplo se muestran las siguientes imágenes tomadas con TerraSAR-X en Toulouse ya mostradas anteriormente en las figuras 4.21 y 4.20. En este caso se necesitaron 33 ráfagas de ScanSAR por 9 de TopSAR para cubrir la misma área.

Este hecho produce que el tiempo de ráfaga en TopSAR aumente respecto ScanSAR, como se puede observar en la tabla 4.1 para Paz, y esto conlleva un aumento de la SNR y de la calidad de la imagen.

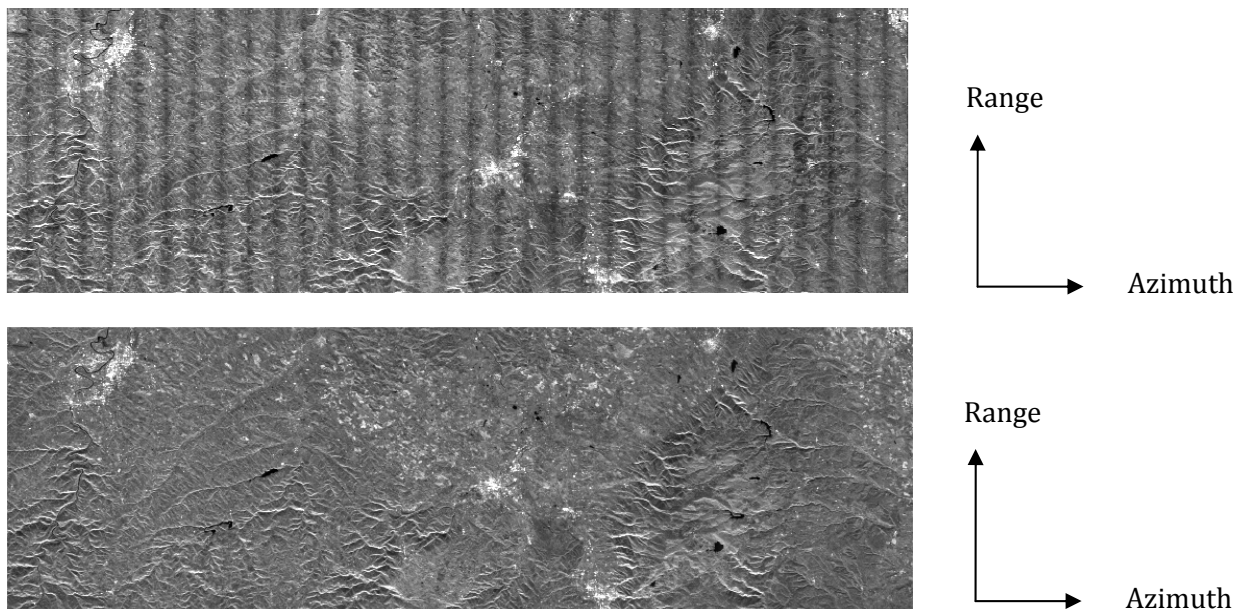


Fig. 4.27: Imágenes tomadas en ScanSAR (arriba) y TopSAR (debajo)

En la imagen 4.27 la resolución en acimut es de 16m y se promediaron 5 pixeles en range para obtener dicha resolución. El tamaño de la escena es de 90 km en acimut y 25 km en range y la variación angular en TopSAR era de  $\pm 0.44^\circ$ .

		ScanSAR	TopSAR	
		TB=TDWELL (s)	TBURST (s)	TDWELL (s)
<b>SC1</b>	<b>SM1</b>	0,05951	0.1205	0.0622
	<b>SM2</b>	0,06041	0.1210	0.0628
	<b>SM3</b>	0,06142	0.1220	0.0640
	<b>SM4</b>	0,06253	0.1231	0.0653
<b>SC2</b>	<b>SM3</b>	0,06142	0.1246	0.0640
	<b>SM4</b>	0,06253	0.1257	0.0653
	<b>SM5</b>	0,06376	0.1270	0.0667
	<b>SM6</b>	0,06508	0.1284	0.0684
<b>SC3</b>	<b>SM7</b>	0,06649	0.1371	0.0701
	<b>SM8</b>	0,06799	0.1388	0.0720
	<b>SM9</b>	0,06957	0.1405	0.0740
	<b>SM10</b>	0,07123	0.1424	0.0761
<b>SC4</b>	<b>SM11</b>	0,07296	0.1533	0.0783
	<b>SM12</b>	0,07475	0.1554	0.0806
	<b>SM13</b>	0,07660	0.1575	0.0829
	<b>SM14</b>	0,07851	0.1596	0.0854
<b>SC5</b>	<b>SM15</b>	0,08047	0.1722	0.0879
	<b>SM16</b>	0,08248	0.1744	0.0905
	<b>SM17</b>	0,08453	0.1768	0.0931
	<b>SM18</b>	0,08663	0.1791	0.0958
<b>SC6</b>	<b>SM19</b>	0,08876	0.1928	0.0985
	<b>SM20</b>	0,09093	0.1953	0.1013
	<b>SM21</b>	0,09314	0.1978	0.1041
	<b>SM22</b>	0,09538	0.2003	0.1070
<b>SC7</b>	<b>SM23</b>	0,09764		
	<b>SM24</b>	0,09993		
	<b>SM25</b>	0,10225		
	<b>SM26</b>	0,10459		

Tabla 4.1: Valores de Tiempo de Ráfaga y Tiempo de Observación (Dwell Time) para ScanSAR y TopSAR (resolución 20m) para Paz

Todas las imágenes de las secciones 4.2 y 4.3 están extraídas de las referencias [4.1], [4.2] y [4.3].

#### **4.6. Referencias**

[4.1]: “TOPS Imaging With TerraSAR-X: Mode Design and Performance Analysis”, Adriano Meta, Josef Mittermayer, Pau Prats, Rolf Scheiber, Ulrich Steinbrecher

[4.2]: “TerraSAR-X TOPSAR and ScanSAR comparison”, Adriano Meta, Pau Prats, Ulrich Steinbrecher, Josef Mittermayer and Rolf Scheiber

[4.3]: “First TOPSAR image and interferometry results with TerraSAR-X”, Adriano Meta, Pau Prats, Ulrich Steinbrecher, Josef Mittermayer and Rolf Scheiber

## **Capítulo 5**

# **Efecto del scalloping en la aplicación de detección de un barco en mar**

### **5.1. Introducción**

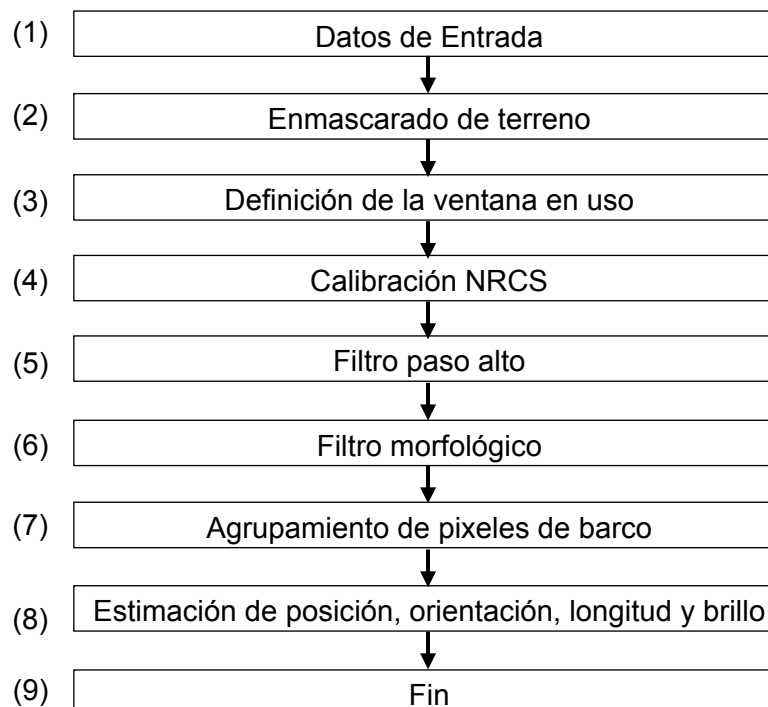
Antes de analizar el efecto del scalloping en dicha aplicación es conveniente dar de forma muy resumida una explicación sobre la metodología empleada para realizar tal detección. Si se desean más detalles relacionados con este tema consulte las referencias descritas en la siguiente explicación, al no ser este análisis el objetivo principal del presente proyecto.

### **5.2. Detección de barcos mediante imágenes SAR**

Para realizar la detección de barcos mediante imágenes SAR existen diversos métodos. En este capítulo se describen 3 de ellos. El primero propuesto por la Universidad Oceánica de China mediante imágenes de ERS, el segundo también emplea imágenes de ERS fue propuesto por la Università degli Studi di Napoli Parthenope mientras que el tercero fue propuesto por Advanced Researches Institute y National Institute for Space Research y fue probado en las costas de Brasil empleando imágenes tomadas por el satélite TerraSAR-X

#### **5.2.1. Algoritmo propuesto por Ocean University of China mediante imágenes de ERS**

El primer algoritmo es el descrito en la referencia [5.1] y sigue el siguiente esquema:





Las etapas 2, 3 y 4 pertenecen al preprocesado. El enmascarado de tierra permite reducir el tiempo de computación y eliminar posibles falsas alarmas. El definir la ventana en el instante de realizar el procesado permite reducir el requerimiento de recursos de computación.

La calibración NRCS (Normalized Radar Cross Section) permite emplear el mismo algoritmo de detección para distintos modos de exploración SAR. En la figura 5.1 se puede observar el resultado tras realizar la calibración NRCS.

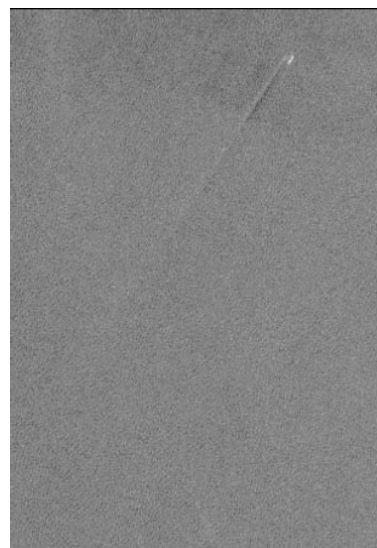


Fig. 5.1: imagen SAR tras calibración NRCS

Las etapas 5 y 6 pertenecen a la clasificación de píxeles del barco. Los blancos se identifican como píxeles brillantes en la imagen SAR, por lo que se emplea un filtro paso alto para detectar dichos posibles blancos. El problema viene del nivel de ruido speckle que puede oscurecer algunos píxeles y se interpreten como que pertenecen a barcos distintos. En ese caso permanecen como barcos distintos. Se emplea entonces un filtro morfológico que reduce los falsos blancos mediante una operación de dilatación y otra de erosión. Dilatación permite llenar pequeños agujeros dentro de un píxel de blanco y conectar píxeles vecinos que pertenecen al mismo barco. Erosión puede eliminar píxeles aislados provocados por speckle y reducir la deformación del barco producida por dilatación. El resultado obtenido tras la clasificación es el mostrado en la figura 5.2.

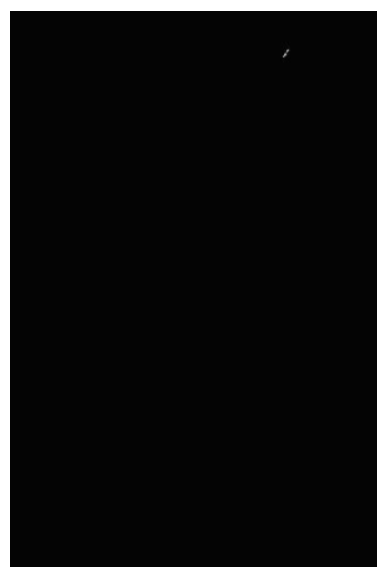


Fig. 5.2: Resultado de la clasificación

La etapa 7 consiste en asignar un identificador a cada barco una vez se ha determinado el conjunto de píxeles que pertenecen a dicho barco. Aparece entonces un problema denominado agrupamiento de píxeles de barco. Para resolver dicho problema se emplea un algoritmo denominado algoritmo de escaneo lineal de semilla de cluster, *scan line based seed cluster algorithm*. El resultado puede observarse en la siguiente tabla antes de emplear el filtro morfológico y después:

Identificador de barco	Número de píxeles de barco	coordenadas (núm. de columna , núm. de fila)
1	48	(751,144),(751,145),(752,143),(752,144),(752,145),(752,146),(753,143),(753,144),(753,145),(753,146),(754,138),(754,140),(754,143),(754,144),(754,145),(755,138),(755,139),(755,140),(755,141),(755,142),(755,143),(756,136),(756,137),(756,138),(756,139),(756,140),(756,141),(756,142),(756,143),(757,136),(757,139),(757,140),(757,141),(757,142),(757,143),(758,136),(758,139),(758,140),(759,136),(759,137),(759,138),(759,139),(759,140),(760,136),(760,137),(760,138),(760,139),(760,140)
2	28	(760,132),(760,133),(760,134),(761,128),(761,130),(761,131),(761,132),(761,133),(762,128),(762,129),(762,130),(762,131),(762,132),(763,127),(763,128),(763,129),(763,130),(763,131),(764,127),(764,128),(764,129),(764,130),(765,127),(765,128),(765,129),(766,127),(766,128),(766,129)
3	1	(763,134)

Tabla 5.1: Resultado del agrupamiento (clustering) de píxeles antes del filtro morfológico

ID de barco	Número de píxeles de barco	coordenadas(núm. de columna , núm. de fila)
1	87	(751,144),(752,144),(753,144),(754,144),(755,144),(757,143),(756,143),(755,143),(754,143),(753,143),(752,143),(757,142),(756,142),(755,142),(754,142),(758,141),(757,141),(756,141),(755,141),(760,140),(759,140),(758,140),(757,140),(756,140),(755,140),(754,140),(760,139),(759,139),(758,139),(757,139),(756,139),(755,139),(760,138),(759,138),(758,138),(757,138),(756,138),(755,138),(754,138),(760,137),(759,137),(758,137),(757,137),(756,137),(755,137),(760,136),(759,136),(758,136),(757,136),(756,136),(759,135),(760,134),(762,133),(761,133),(760,133),(762,132),(761,132),(760,132),(763,131),(762,131),(761,131),(764,130),(763,130),(762,130),(761,130),(766,129),(765,129),(764,129),(763,129),(762,129),(766,128),(765,128),(764,128),(763,128),(762,128),(761,128),(766,127),(765,127),(764,127),(763,127),(763,134),(754,145),(753,145),(752,145),(751,145),(753,146),(752,146)

Tabla 5.2: Resultado del agrupamiento de píxeles después del filtro morfológico

La última etapa consiste en determinar parámetros del barco como posición, orientación, longitud y forma. El resultado se muestra en la siguiente tabla

Identificador de barco	Posición del barco		Orientación (grados)	Longitud del barco (m)	Beam del barco(m)
	Longitud(grados)	Latitud(grados)			
1	124.299E	34.129N	50	320	75

Tabla 5.3: Resultados de la estimación de parámetros del barco

### **5.2.2. Algoritmo propuesto por Università degli Studi di Napoli Parthenope mediante imágenes de ERS**

En la referencia [5.2] Università degli Studi di Napoli Parthenope propuso un algoritmo que añade al método anterior conceptos como CFAR (Constant False Alarm Rate) (tasa de falsa alarma constante) o factor de granulado (rice factor), que se define como la relación entre la potencia de la señal reflejada coherente y potencia de la señal reflejada incoherente, y es sensible a la presencia de un objeto con un alto nivel de reflexión como puede ser un barco. Los resultados obtenidos con este algoritmo pueden observarse en las siguientes figuras:

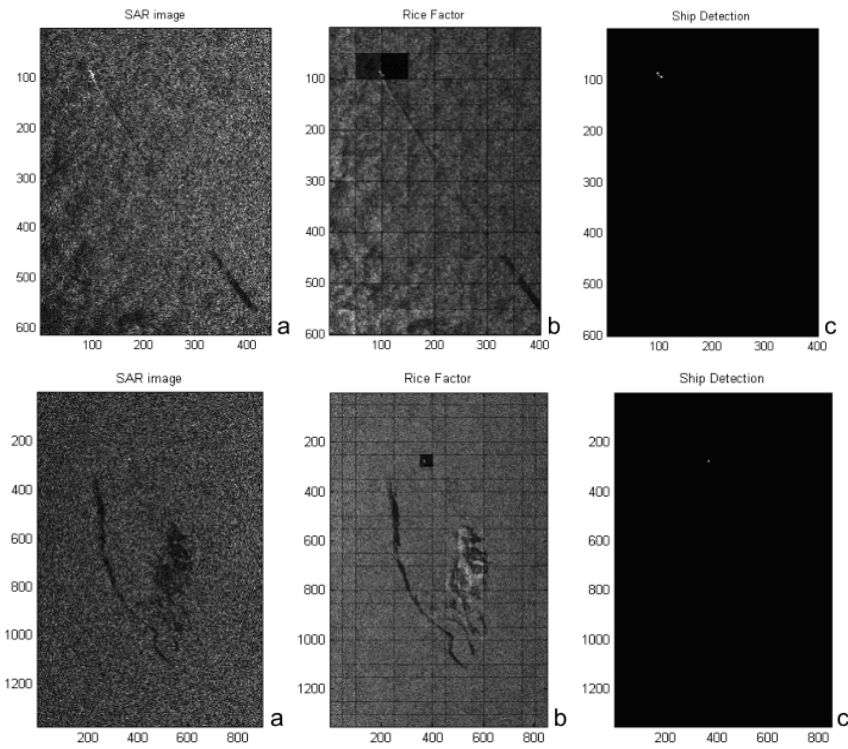


Fig. 5.3: Imagen tomada con ERS  
A: imagen SAR B: imagen analizando el factor de granulado C: resultado de la detección

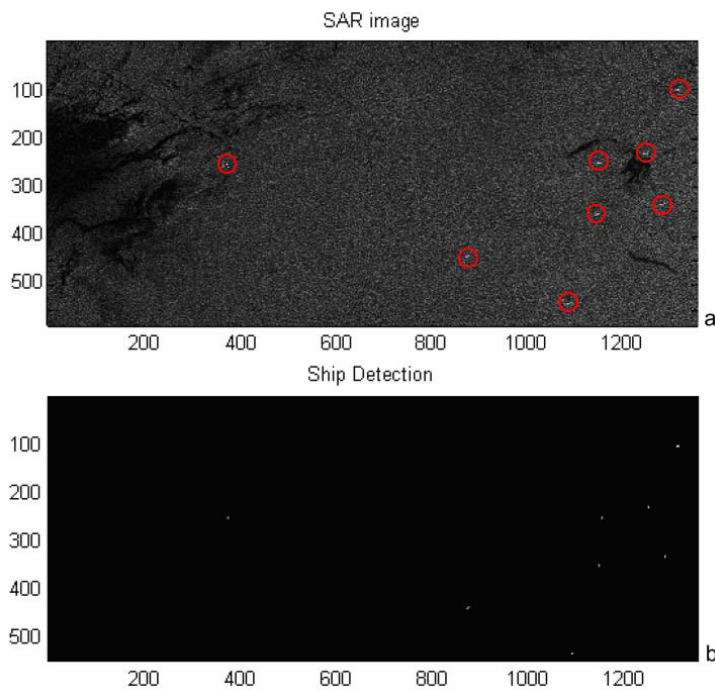


Fig. 5.4: Imagen tomada con ERS  
A: imagen SAR B: Resultado de la detección

### **5.2.2. Algoritmo propuesto por Advanced Researches Institute y el National Institute for Space Research mediante imágenes de TerraSAR-X de Brasil**

#### **5.2.2.1. Descripción del Algoritmo**

En la referencia [5.3] se detalla un método de detección de barcos empleando imágenes SAR obtenidas con TerraSAR-X que fue probado en las costas de Brasil. Aquí se dará una breve explicación de dicho método.

En esta prueba se trabajó en modo ScanSAR con una resolución de 16 m, tamaño de pixel de 8.25 metros, ancho de swath es de 100x150km e imágenes obtenidas con polarización HH y VV.

Se obtuvo información sobre el terreno mediante un sistema AIS (Automatic Information System) y se poseían datos acerca del posicionamiento de plataformas petrolíferas. También se utilizó información meteorológica y de vientos proporcionada por los satélites GOES-10 y Quickstart de la zona escaneada por el satélite durante la obtención de datos SAR.

Cada imagen obtenida por el radar era de un tamaño de 17000x20000 píxeles, por lo que primero de todo se dividía la imagen en 9 o más trozos de 5000x5000 píxeles para reducir el coste computacional. Cada una de las imágenes era transformada a un conjunto de valores de intensidad y se calculaba la autocorrelación entre píxeles tanto en la dirección horizontal como en la vertical.

A partir de los resultados de autocorrelación se comprobaba si la estadística de la imagen se podía aproximar por una distribución de tipo K mediante el test de Kolmogorov-Smirnov (KS) y se estimaban los parámetros de dicha distribución, que son valor medio, numero de looks (ENL) y parámetro de orden ( $v$ ).

El valor de ENL se define como

$$ENL = \frac{\text{Media}^2}{\text{Varianza}} \quad (5.1)$$

Y el de orden ( $v$ ) mediante la siguiente relacion:

$$\ln v - \psi^{(0)}(v) + \frac{v}{ENL} \left( \frac{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M x_i^2}{\left( \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M x_i \right)^2} \right) = \ln \left( \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M x_i \right) - \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \ln(x_i) + \frac{1}{2ENL} \quad (5.2)$$

Donde  $\psi^{(0)}$  corresponde con una función digamma y  $x_i$  representa cada elemento del conjunto de muestras.

De este modo se obtenía un umbral basado en probabilidades de falsa alarma y parámetros de distribución obtenidos anteriormente. Los píxeles con un valor superior a dicho umbral se consideraron como posible blanco y los píxeles con un valor inferior como mar.

Con esta comprobación inicial se marcaban los puntos en que los píxeles pasaban de corresponder a agua a corresponder a un posible barco.

Finalmente se cruzó la información de clutter obtenida con los sistemas AIS para comprobar la viabilidad del algoritmo. Para valorar dicha capacidad se empleaba una figura de mérito definida por la siguiente ecuación:

$$FoM = \frac{N_{td}}{N_{fa} + N_{gt}} \quad (5.3)$$

Donde  $N_{td}$  es el número de detecciones reales,  $N_{fa}$  el número de falsas alarmas y  $N_{gt}$  el número de detecciones de terrenos reales.

El algoritmo se basa en el concepto de Tasa de Falsa Alarma Constante (CFAR) y define unas ventanas de tamaño 5x5, 7x7, 15x15 píxeles para blanco, buffer y fondo respectivamente. Se denomina a esta configuración como 5\_7\_15.

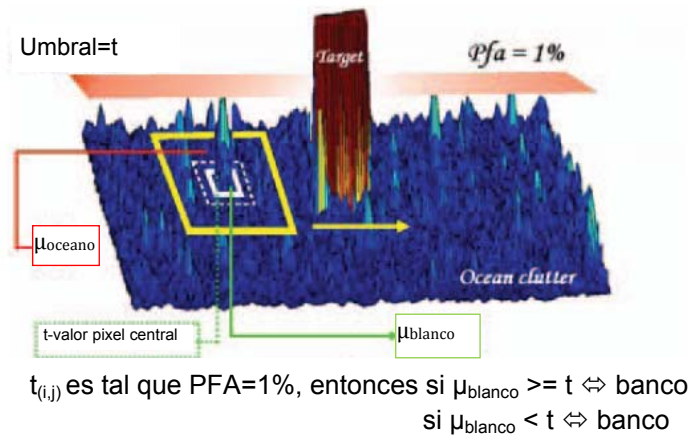
Para realizar la detección debía calcularse el nuevo umbral resolviendo la ecuación siguiente:

$$PFA^{(k)} = \frac{2}{\Gamma(v_B)} \cdot \left( \frac{v_B t}{\mu_B} \right)^{\frac{v_B}{2}} \cdot K_{v_B} \cdot \left[ 2 \sqrt{\frac{v_B t}{\mu_B}} \right] \quad (5.4)$$

Donde  $\mu_B$  es el valor medio de la ventana del fondo y  $t$  es el valor central de la ventana de blanco que puede usarse como umbral si se corresponde a una PFA (Probabilidad de Falsa Alarma) predefinida.

La probabilidad de falsa alarma debe definirse previamente y el resto de parámetros se pueden obtener de forma adaptativa.

Una vez obtenido el nuevo valor de umbral el algoritmo ya no comparaba cada píxel con el valor umbral sino que comparaba el valor medio dentro de la ventana de blanco con el valor de umbral. Si era igual o superior se aceptaba como blanco, sino se rechazaba.



### 5.2.2.2. Resultados Obtenidos

El estudio de autocorrelación se realizó para las componentes de distancia cercana, media y lejana al satélite y los resultados obtenidos se decorrelaron transformando la imagen en un vector de 121 muestras con los que se estimaron los parámetros de la distribución  $k$ , cuyos valores pueden observarse en la siguiente tabla:

	Polarización VV			Polarización HH		
Distancia	Cercana	Media	Lejana	Cercana	Media	Lejana
Media	7472.0	4733.8	3758.2	4747.4	2202.8	1625.5
ENL	5	4	5	3	5	4
$\nu$	10	6	10	3	10	6
Kurt	3.442	4.1986	4.2493	6.3756	2.819	3.3388
Skew2	0.6224	1.2941	1.3381	2.3596	0.4574	0.7057

Tabla 5.4: parámetros estadísticos

Con estos parámetros se generó la función de distribución  $k$  y fue comparada con la función de distribución de la imagen real. En la siguiente grafica se observa como dicha función es una buena aproximación:

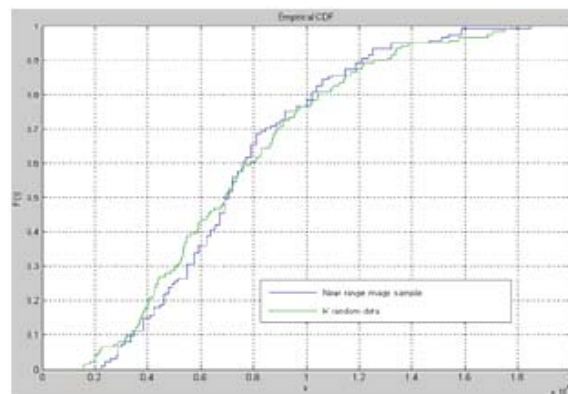


Fig. 5.5: función de distribución  $K$  teórica y función de distribución real de la imagen

### 5.2.2.3. Efecto del ángulo de incidencia

Típicamente las falsas alarmas se obtuvieron en la distancia lejana al satélite y la pérdida de blancos en la distancia cercana cuando los vientos eran suaves y las celdas de lluvia y los cumulonimbos poco significativos. Sin embargo cuando esta condición no se cumplía las falsas alarmas aparecían incluso en la distancia cercana al satélite. Este hecho llevó a tener que definir diferentes umbrales y a limitar el análisis a áreas lo más homogéneas posibles.

Una imagen de 2000X2000 píxeles se corresponde a un área de 17x17km (8.5 m por pixel) y se comprobó que se podía considerar suficientemente homogénea.

En la siguiente tabla se observan los valores de umbral definidos para distancia cercana y lejana que emplearon utilizando una ventana 5\_7\_15:

Distancia	Umbral
Lejana	12769
Cercana	39204

Tabla 5.5: umbral en función del ángulo de incidencia

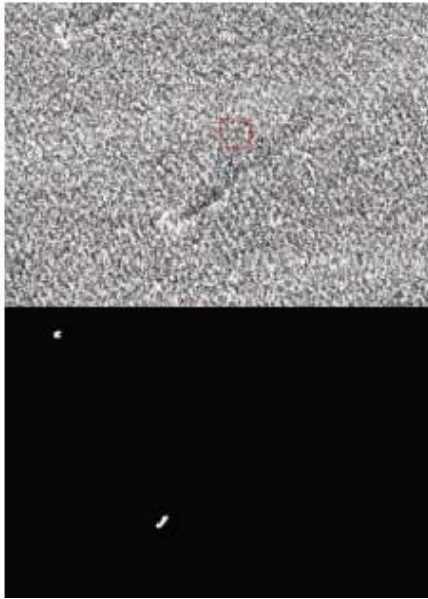
Otra configuración de ventana disponible era 3\_7\_15 que permitía trabajar con un área de fondo más extensa separando aún más el blanco del fondo. El problema que aparecía es que una agrupación de clutter podía ser suficientemente intensa en la componente de distancia cercana que se podía confundir con un blanco. Debido a este hecho se consideró la opción 5\_7\_15 y PFA de 1% como una buena elección.

Los resultados obtenidos en las pruebas pueden observarse en la siguiente tabla:

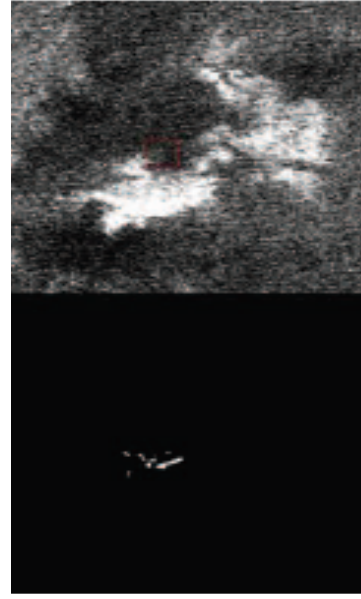
Fecha de imagen	Numero de falsas alarmas	Numero de perdidas	Numero de detecciones reales	Numero de terrenos reales	FoM
12 julio 2008	1	0	4	4	0.8
24 julio 2008	15	1	24	25	0.6
9 agosto 2008	0	0	6	6	1
4 noviembre 2008	7	0	22	22	0.75
30 octubre 2008	0	2	41	43	0.95

Tabla 5.6: resultados de la detección

La figura 5.6 muestra una imagen obtenida con el radar y su análisis de detección realizado posteriormente y la figura 5.7 muestra como la presencia de nubes afecta en un incremento de falsas alarmas:



*Fig. 5.6: Agosto 2008; imagen original e imagen tras la detección*



*Fig. 5.7: Falsa alarma producida por nubes*

#### **5.2.2.4. Cuestiones operacionales**

Existen diversos problemas para poder conseguir un sistema de vigilancia marítima en tiempo casi real. Primero está el hecho que el entorno marítimo cambia de forma muy rápida en períodos muy cortos de tiempo. La idea principal de estos sistemas de vigilancia mediante satélites SAR es obtener una detección en un área muy extensa. La obtención de los datos SAR se realiza con un retraso conocido que puede ser de unas 2 horas desde que se obtiene la imagen hasta que se descarga a tierra. Una vez recibidos los datos la empresa propietaria del satélite debe procesarlos y enviarlos al cliente que realiza la vigilancia marítima. Ese tiempo puede resultar excesivo y puede posibilitar que no se consiga cuadrar dicha imagen con la información local obtenida con los sistemas AIS o que posibilite a los barcos cambiar de dirección o velocidad. Por ejemplo el vuelo de comprobación del avión que se realizó en la prueba del 12 de junio de 2008 se realizó 3 horas después de obtener la imagen. Este tiempo puede ser demasiado alto para aplicaciones de emergencia y el camino a seguir en investigaciones implicadas en este tipo de sistemas debe dirigirse a obtener los datos de forma más rápida. También se debe trabajar en planes de orbitas que produzcan las imágenes de forma más seguida.

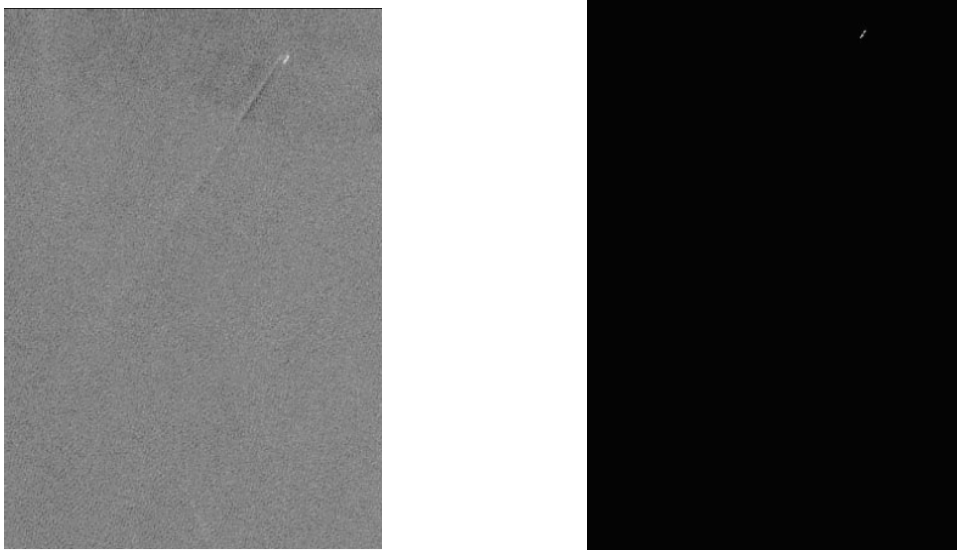
Para resolver el problema de orbita se están desplegando orbitas de satélites, como SAR-Lupe y COSMO, que permitirían obtener detecciones cada 2 días, y sistemas que emplean satélites geosíncronos como el propuesto en la referencia [5.4] que permitirían obtener detecciones de forma diaria.



Una vez realizada la detección para obtener la identificación típicamente se emplean radares basados en análisis por interferometría o polarimetría, aunque también podría optarse por sistemas de satélites que trabajen en tándem, como se detalla en el capítulo de líneas futuras de la presente memoria.

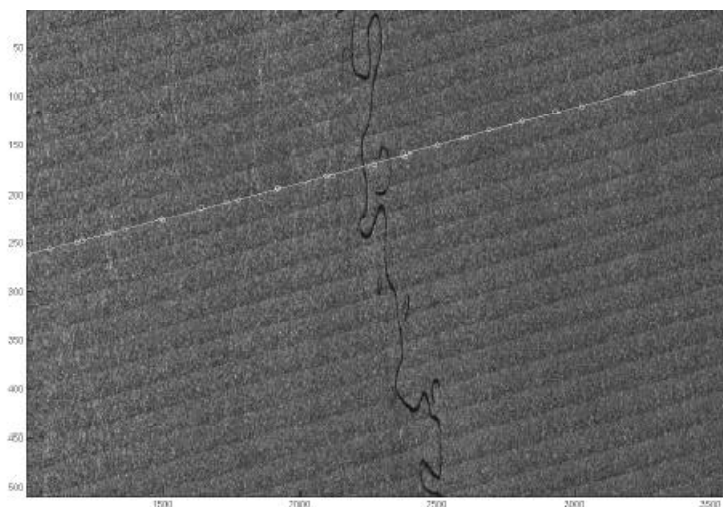
### **5.3. Efecto del scalloping en la detección de barcos**

Como se ha visto anteriormente en la detección de barcos mediante imágenes SAR el objetivo es obtener una imagen de puntos negros que representan el mar y blancos que representan el barco, como la mostrada en la figura 5.8



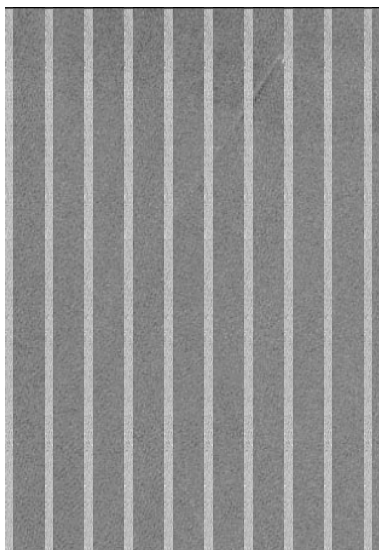
*Fig. 5.8: imagen SAR tras calibración NRCS y tras clasificación*

Cabe recordar que el efecto de scalloping podía mostrarse visualmente como se observa en la figura 5.9.

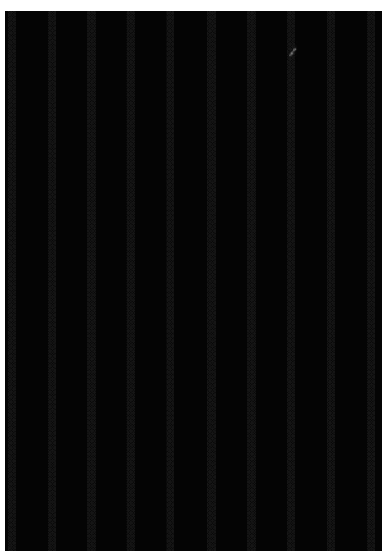


*Fig. 5.9: Imagen tomada con Radarsat*

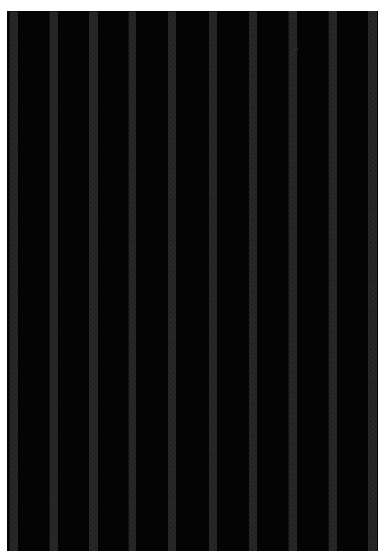
Si la imagen de la figura 5.8 estuviera afectada por el mismo scalloping que el mostrado en la figura 5.9 el resultado podría ser el mostrado en la siguiente figura, en las cuales se observa como el scalloping puede dificultar o incluso imposibilitar la detección del barco.



*Fig. 5.10: imagen SAR tras calibración NRCS*



*Fig. 5.11: imagen SAR tras clasificación  
Detección aún es posible*



*Fig. 5.12: imagen SAR tras clasificación  
Detección es imposible*

#### **5.4. Referencias**

[5.1]: “Sea Surface Ship Detection in SAR Images”; Yingjian Liu, Qian Feng

[5.2]: “Ship Detection over Single-Look Complex SAR Images”; M. Migliaccio,  
A. Gambardella, F. Nunziata

[5.3]: “Ship detection in the brazilian coast using TerraSAR-x SAR images”;  
Rafael L. Paes, João A. Lorenzzetti, Douglas F. M. Gherardi

[5.4]: “Estudio de viabilidad de los radares de apertura sintética geosíncronos”;  
Alba González Quintás, Antoni Broquetas Ibars

# **Capítulo 6**

## **Conclusiones y** **líneas de trabajo futuro**

## 6.1. Conclusiones

Como se ha visto en los capítulos precedentes el efecto radiométrico scalloping aparece en los modos a ráfagas de los radares, como ScanSAR. Dicho modo de exploración es muy utilizado ya que proporciona imágenes del orden de 100 km<sup>2</sup> de área con una resolución de alrededor de 10 metros y tiene otras aplicaciones como la detección de barcos en el mar.

El scalloping se define como una variación de la potencia, no así de la fase, que aparece en la dirección acimutal o paralela al desplazamiento del satélite y es debido a la forma del diagrama de radiación de la antena y al error de estimación de la frecuencia Doppler del centroid.

En el presente proyecto se ha cuantificado el efecto del scalloping numéricamente en los casos en que no se realiza ninguna ponderación o cuando se realiza una ponderación inversa del diagrama de ganancia en acimut para el caso de emplear el modo de exploración ScanSAR en el satélite Paz. También se ha realizado la cuantificación para los radares Radarsat y Envisat cuando se emplea ponderación rectangular, inversa de ganancia o Bamler, aunque este último no se ha tenido en cuenta a la hora de realizar las comparaciones con Paz ya que no es aplicable en dicho satélite.

También se ha introducido un modo de exploración denominado TopSAR que actualmente está en pruebas con el satélite TerraSAR-X y que permite eliminar el efecto del scalloping obteniendo resoluciones muy cercanas a las proporcionadas por ScanSAR.

Para introducir de forma resumida los resultados obtenidos se muestran aquí las gráficas para el satélite Paz en los modos ScanSAR con ponderación rectangular e inversa, y en TopSAR.

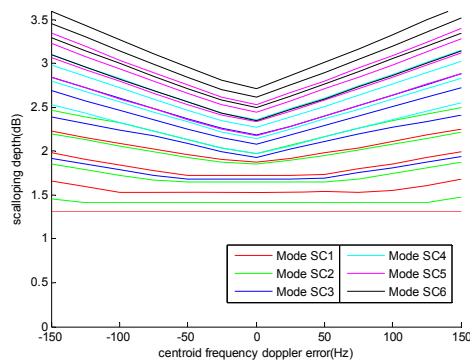


Fig. 6.1: ScanSAR – Ponderación Rectangular

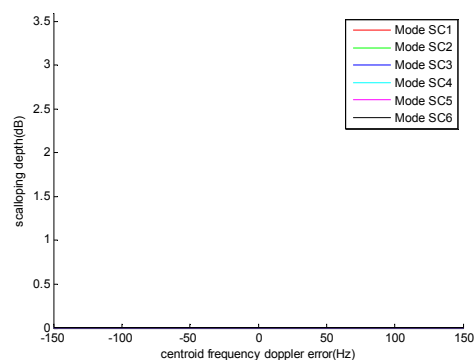


Fig. 6.2: TopSAR – Ponderación Rectangular

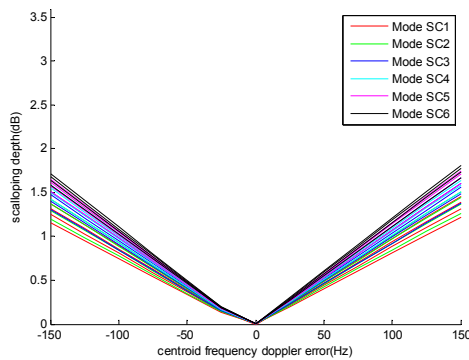


Fig. 6.3: ScanSAR – Ponderación Inverso de Ganancia en Azimut

Como efectos secundarios de scalloping se han analizado su impacto visual en las imágenes tomadas por un radar y cómo afectaría a una aplicación concreta como puede ser la detección de un barco. En la siguiente se muestra una imagen ya mostrada anteriormente en la que se aprecia el efecto del scalloping.

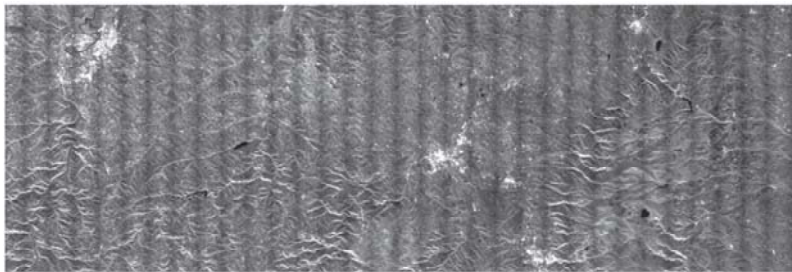


Fig. 6.4: imagen ScanSAR tomada por TerraSAR-X sobre Toulouse

Se ha mostrado mediante imágenes como el modo TopSAR es una buena solución para eliminar el impacto de scalloping como puede observarse en la siguiente imagen

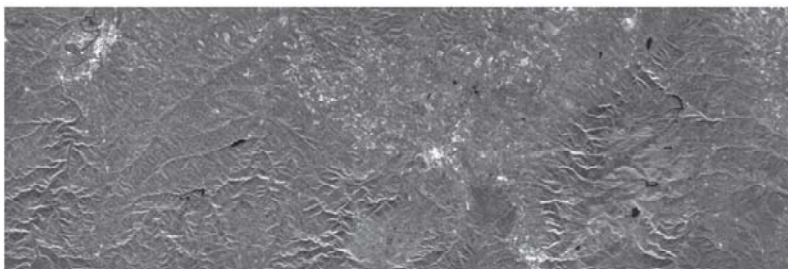


Fig. 6.5: imagen TopSAR tomada por TerraSAR-X sobre Toulouse

Además se ha introducido en el capítulo 4 el hecho que en el modo TopSAR se requiere un menor número de conmutaciones en acimut para analizar la misma área y esto proporciona imágenes con una mayor SNR.

Para finalizar recordar que el scalloping sólo afecta a la potencia y no así a la fase de la señal, por lo que aplicaciones como interferometría o interferometría diferencial no tendrían que verse afectadas. No ocurriría lo mismo con aplicaciones basadas en polarimetría que se basan en la medida de intensidad de las diferentes polarizaciones de la señal.

## **6.2. Líneas de trabajo futuro**

Debido a que el efecto scalloping es apenas perceptible cuando se emplea el modo de exploración TopSAR como se ha mostrado en los capítulos 3 y 4, las líneas de trabajo futuro que se proponen en este capítulo están orientadas en 2 vías muy diferenciadas entre sí.

### **6.2.1. TopSAR de alta resolución**

En la primera se propone estudiar un modo TopSAR que no tuviera como inconveniente la pérdida de resolución debida a la variación angular, lo cual podría conseguirse aumentando el valor del incremento de ángulo en cada conmutación en acimut (*steer*) de modo que todos los puntos fueran vistos unas pocas veces pero suficientes como para emplear el método de Bamler, que en opinión de toda la documentación consultada, es un muy buen método para eliminar el scalloping pero no es aplicable en el modo ScanSAR de Paz. El problema que conllevaría esta opción, y que debería ser estudiada, es el hecho que quizás los puntos de la escena no serían vistos con el mismo número de conmutaciones y conllevaría el tener que aplicar diferentes métodos de Bamler en función del punto en estudio, cosa que podría ser inviable. Pero de conseguirse se aumentaría la resolución al permanecer el diagrama más tiempo observando un punto antes de realizar la conmutación y la resolución obtenida mejoraría incluso la de ScanSAR al emplear tiempos de ráfaga mayores.

### **6.2.2. Identificación de barcos en tiempo real**

La otra vía es la que se aleja del estudio del scalloping y se acerca más a la explicación realizada en el capítulo 5 sobre la detección de barcos. En dicho capítulo se vio que mediante ScanSAR o TopSAR la detección de barcos es viable pero no la identificación debido a la resolución empleada en dichos sistemas, para la cual se requeriría modos de exploración Spotlight o High-Resolution Spotlight. El problema, como se vio en dicho capítulo, es el tiempo que se tardaría en decidirse qué zona debe ser explorada y el tiempo empleado en el posterior procesado en Spotlight.

Por eso la segunda propuesta realizada en este capítulo es emplear 2 satélites que trabajen en pseudo-tándem. El primero escanearía el área en ScanSAR o TopSAR, decidiría en que coordenadas aproximadamente está situado el barco, se lo comunicaría al 2º satélite y este realizaría la exploración en Spotlight. Según las

especificaciones de TerraSAR-X el área escaneada en ScanSAR es de  $100 \times 100 \text{ km}^2$  mientras que el área escaneada por Spotlight está alrededor de los  $10 \text{ km}^2$ , por lo que la precisión de las coordenadas estimadas en ScanSAR no necesitaría ser demasiado alta.

El funcionamiento de este sistema separado en tres pasos puede observarse en las siguientes figuras:

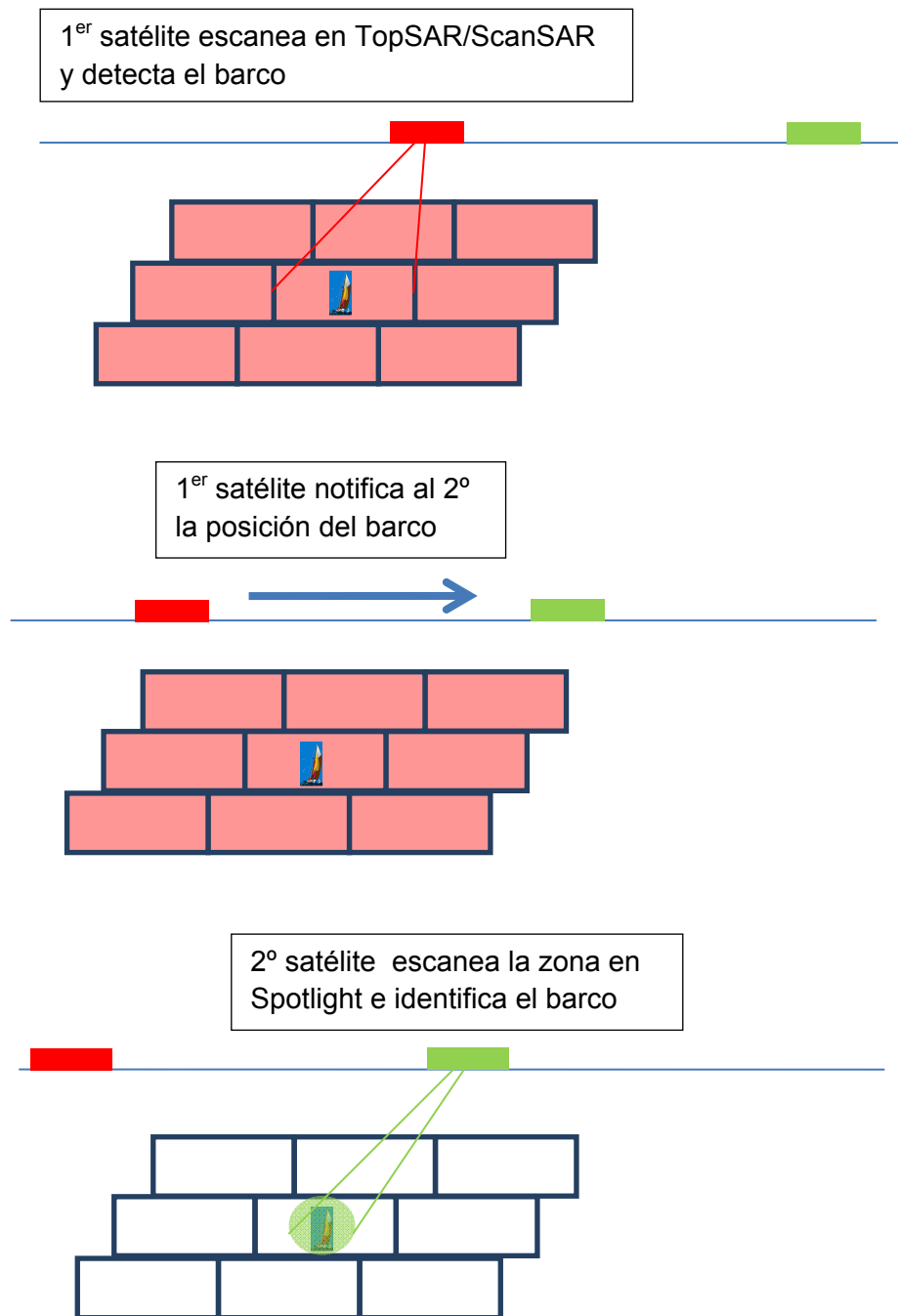


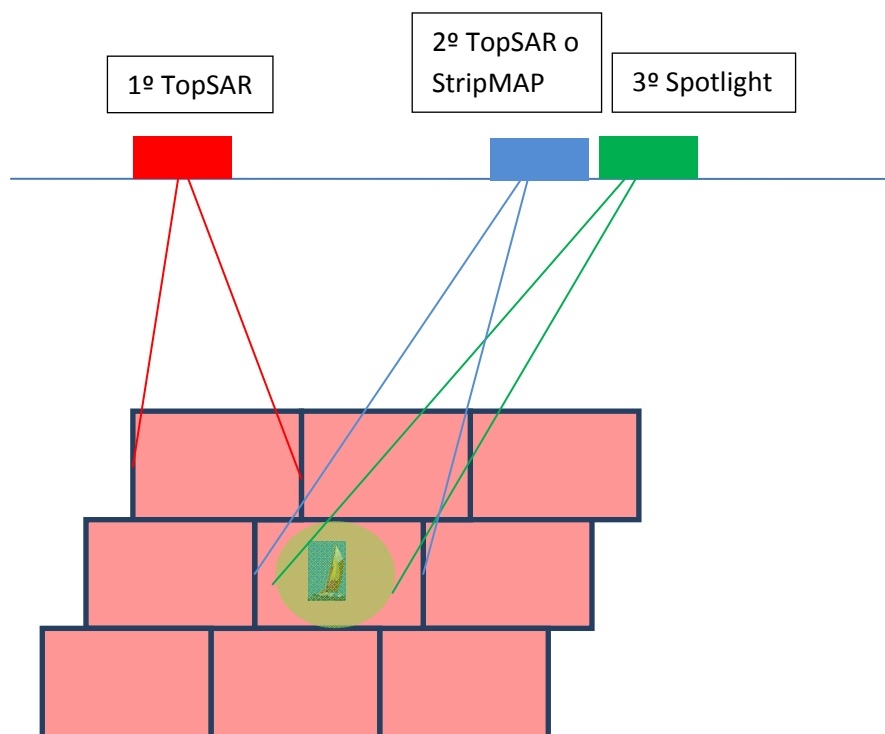
Fig. 6.6: identificación de barcos con 2 satélites trabajando en pseudo-tandem



El problema del sistema descrito anteriormente sería que debido a la distancia entre ambos satélites podría ocurrir que el barco se desplazara fuera del área que se analizaría en Spotlight.

Por ejemplo si el área escaneada en Spotlight es de unos  $10 \times 10 \text{ km}^2$  un barco a una velocidad de 23 nudos (41 km/h) tardaría alrededor de 10 minutos en abandonar dicha zona.

Para solucionar este problema se podría añadir un tercer satélite que viajara más cerca del satélite en Spotlight. Este satélite realizaría un escaneo en ScanSAR o TopSAR pero en un área más reducida que el primero y realizaría una corrección de las coordenadas del área que debe observar el radar en Spotlight. Dicha representación puede observarse en la siguiente figura.



*Fig. 6.7: identificación de barcos con 3 satélites trabajando en pseudo-tandem*

El problema de esta última propuesta proviene del proceso de procesado de datos SAR y de la ejecución de los algoritmos de detección de barcos. Para que este sistema fuera viable dicho procesado y detección deberían realizarse en el propio satélite, cosa que hoy día es inviable debido a la capacidad de cálculo y almacenamiento de los satélites actuales, ya que si se realizara en tierra el tiempo empleado en la descarga, procesado y transmisión de datos y la transmisión de ordenes haría imposible su funcionamiento en un tiempo casi-real.

## **Capítulo 7**

# **Manual de la aplicación BUMSA** **(Burst Modes Scalloping Analyzer)**

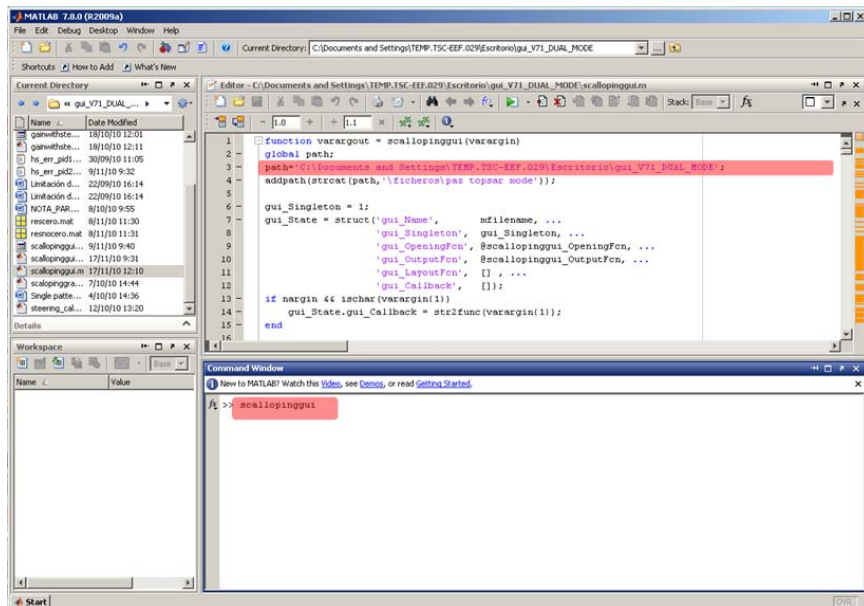
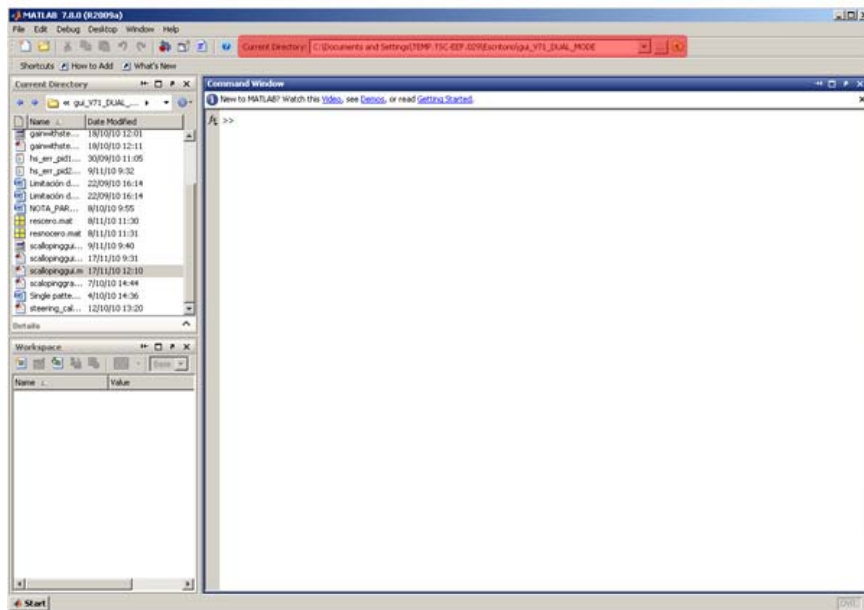
## 7.1. Ejecución de la aplicación BUMSA

Para ejecutar la aplicación BUMSA (Burst Modes Scalping Analyzer) hay que seleccionar como *current directory* de la aplicación Matlab la carpeta BUMSA\_FINAL\_VERSION, modificar la variable *path* que se define en la 2ª línea del fichero *scalpinggui.m* que ahora mismo es la siguiente:

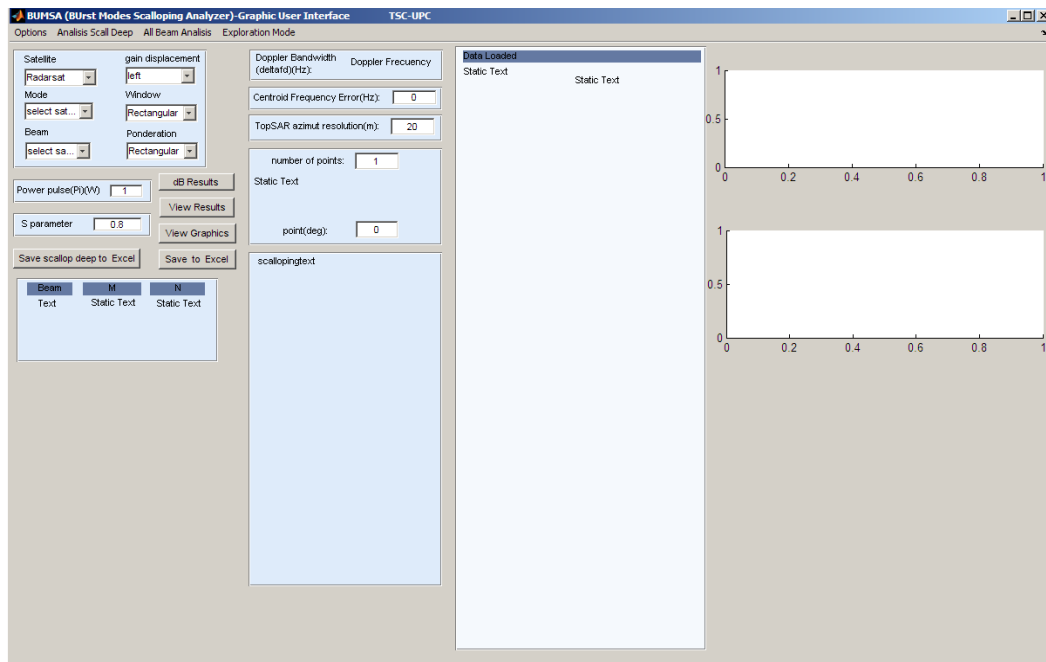
```
path='C:\Documents and Settings\TEMP.TSC-EEF.032\Escritorio\BUMSA_FINAL_VERSION';
```

Si por ejemplo la carpeta se encuentra en C:\ esta variable debería tener el siguiente valor

```
path='C:\BUMSA_FINAL_VERSION';
```



Escribir el comando *scalpinggui* en el workspace y aparecerá la siguiente ventana:



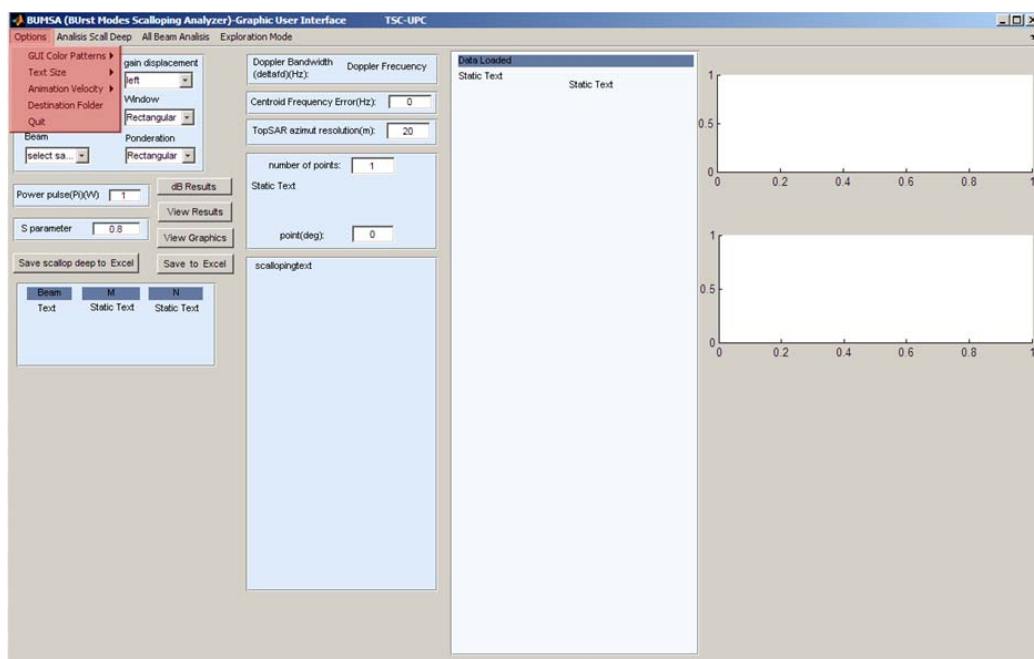
El tamaño de esta ventana puede modificarse igual que cualquier aplicación Windows®.

## 7.2. Descripción del menú de opciones superior

En esta sección se detallan las opciones de la barra superior de la aplicación.

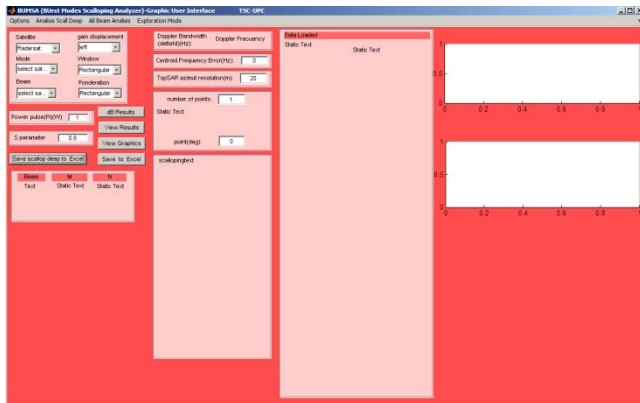
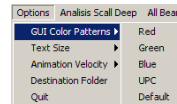
### 7.2.1. Descripción de la opción Options

La opción *Options* contiene 5 opciones:

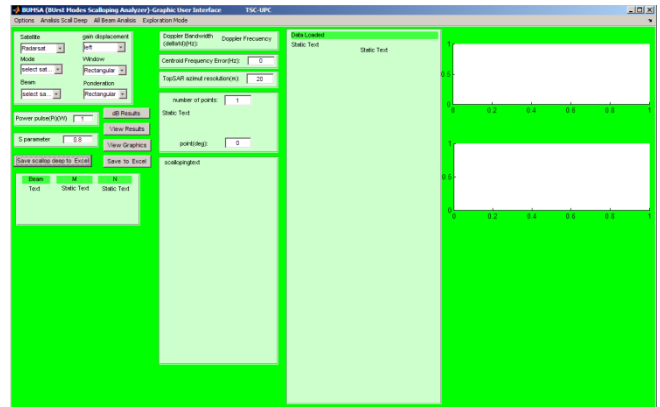


### · GUI Color Patterns

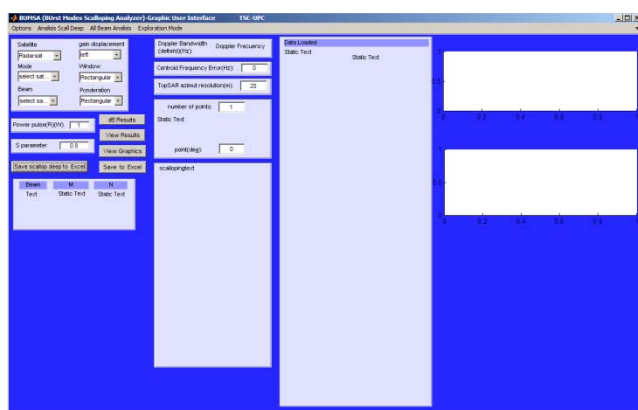
Permite modificar el tema visual de la aplicación. Las opciones disponibles son *RED*, *GREEN*, *BLUE*, *UPC*, *DEFAULT*, que se pueden observar en las siguientes imágenes.



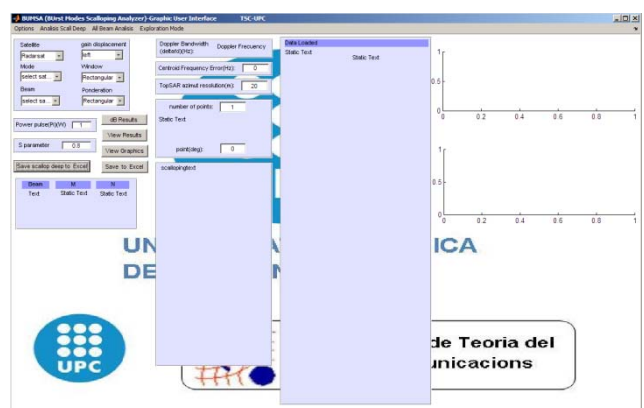
RED



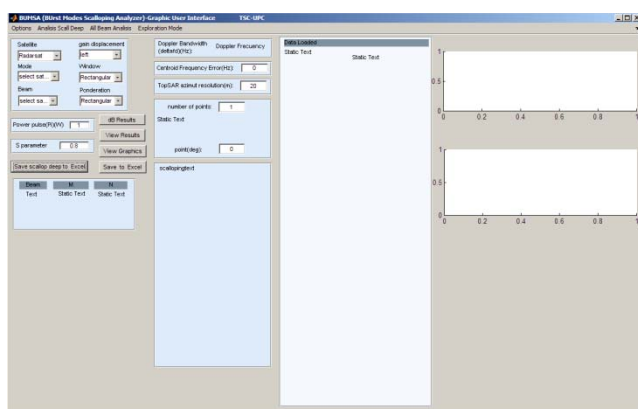
GREEN



BLUE



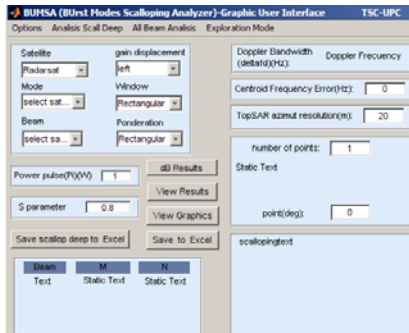
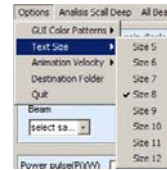
UPC



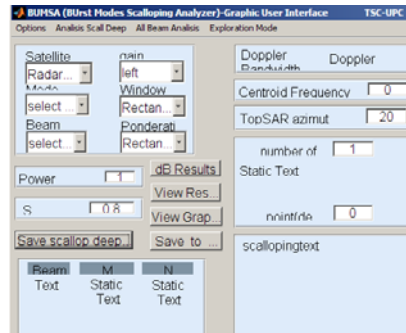
DEFAULT

### · Text Size

Esta opción permite modificar el tamaño del texto de la ventana de la aplicación



Size 8

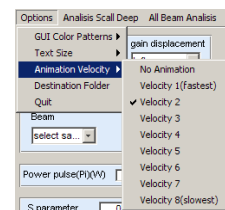


Size 12

Esta opción es útil cuando se modifica el tamaño de la ventana al pasar de un ordenador con pantalla 4/3 a otra de 16/9.

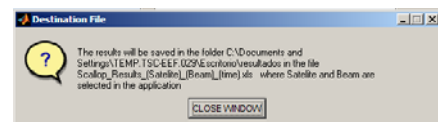
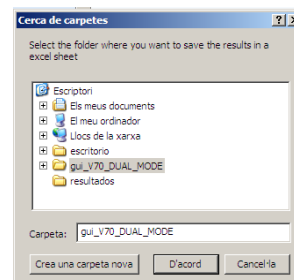
### · Animation Velocity

Este menú selecciona la velocidad de la animación que se visualiza al activar la opción *view graphics*. Si se activa la opción *No Animation* el programa muestra los gráficos pero no la animación.



### · Destination Folder

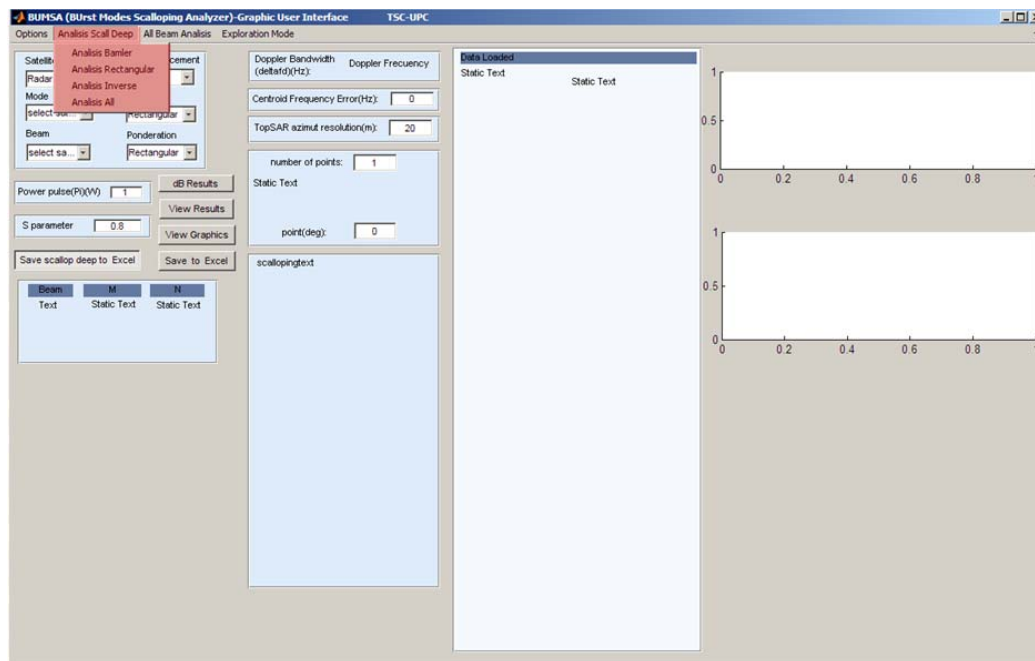
Activa una ventana emergente que permite al usuario seleccionar la carpeta en la que se desean guardar los ficheros Excel en el caso que sea necesario. En el caso que por algún motivo la ejecución del programa se interrumpiera por un error de Matlab esta opción debe seleccionarse de nuevo ya que de no hacerlo los ficheros se guardarían en una carpeta distinta. Tras seleccionar la carpeta aparecerá una ventana informando de la carpeta de destino y el nombre del fichero.



### · Quit

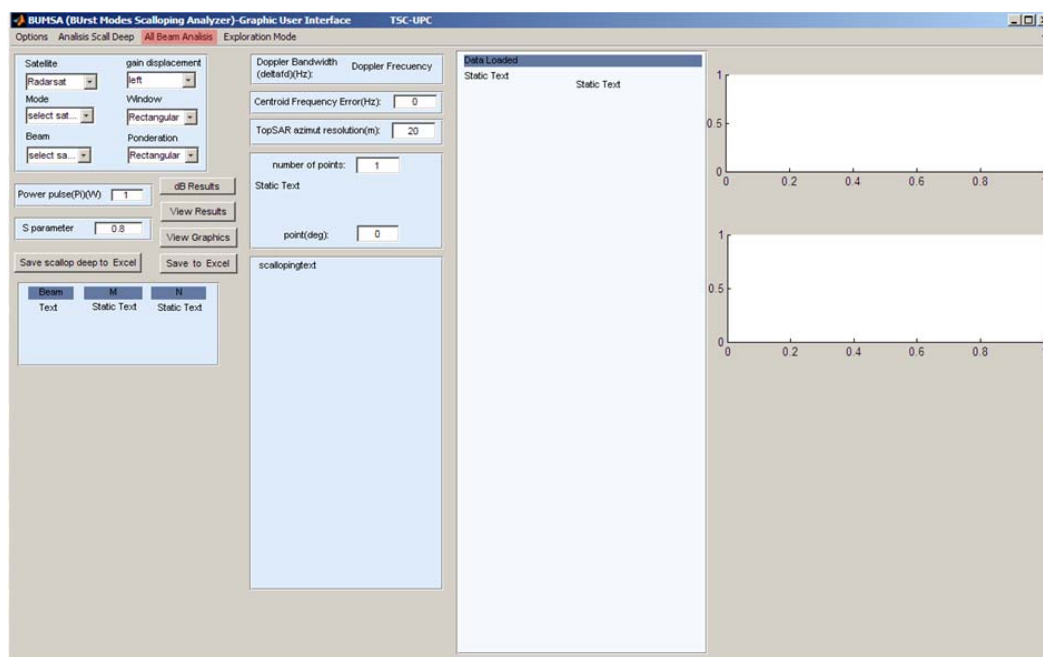
Cierra la aplicación

### 7.2.2. Descripción de opción Analisis Scal Deep



La opción *Analisis Scal Deep* permite analizar la profundidad de scalloping para los distintos errores de frecuencia Doppler del centroid definidos en el fichero *Analisis\_initial.m* para el beam seleccionado empleando los métodos Bamler (*Analisis Bamler*), Rectangular (*Analisis Rectangular*), Inverso de Ganancia (*Analisis Inverse*) o con todos ellos (*Analisis All*). Tras finalizar el análisis se muestra la gráfica con los resultados obtenidos.

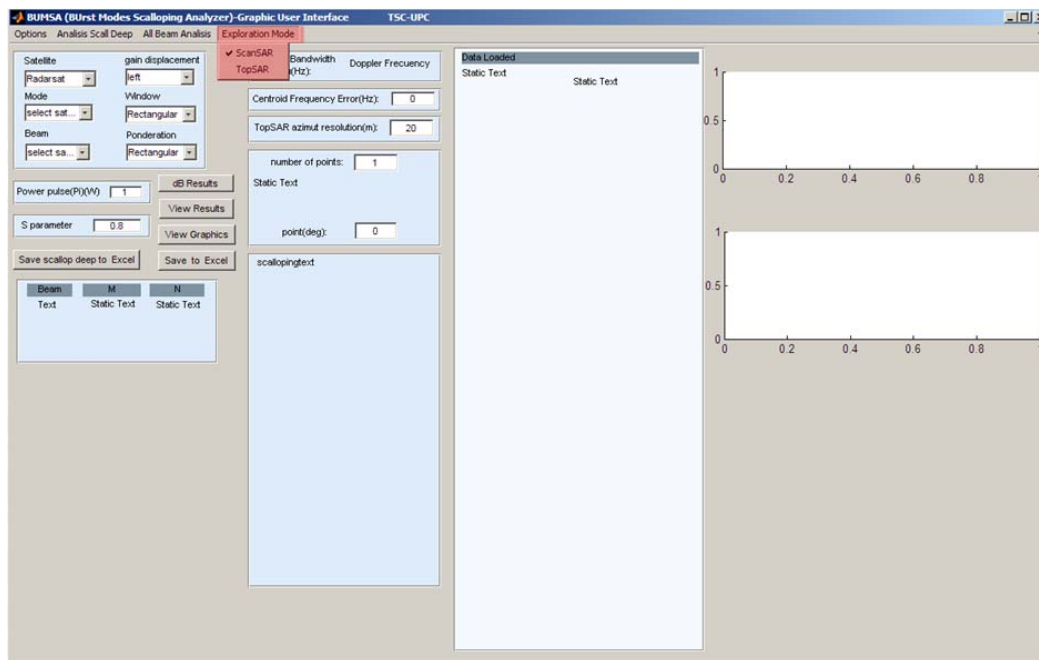
### 7.2.3. Descripción de opción All Beam Analysis



### · All Beam Analysis

Esta opción no tiene submenús. Su activación inicia el análisis de la profundidad de scalping de todos los beams del satélite con todos los métodos. Los resultados se guardan en ficheros Excel ordenados en una carpeta por cada modo de exploración del satélite. Dichas carpetas se guardan en la carpeta seleccionada en el submenú *Destination Folder* del menú *Options*. Se aconseja que antes de activar dicha opción se seleccione la carpeta de destino de nuevo para evitar que los resultados se guarden en una carpeta no deseada.

## 7.2.4. Descripción de la opción Exploration Mode



### · Exploration Mode

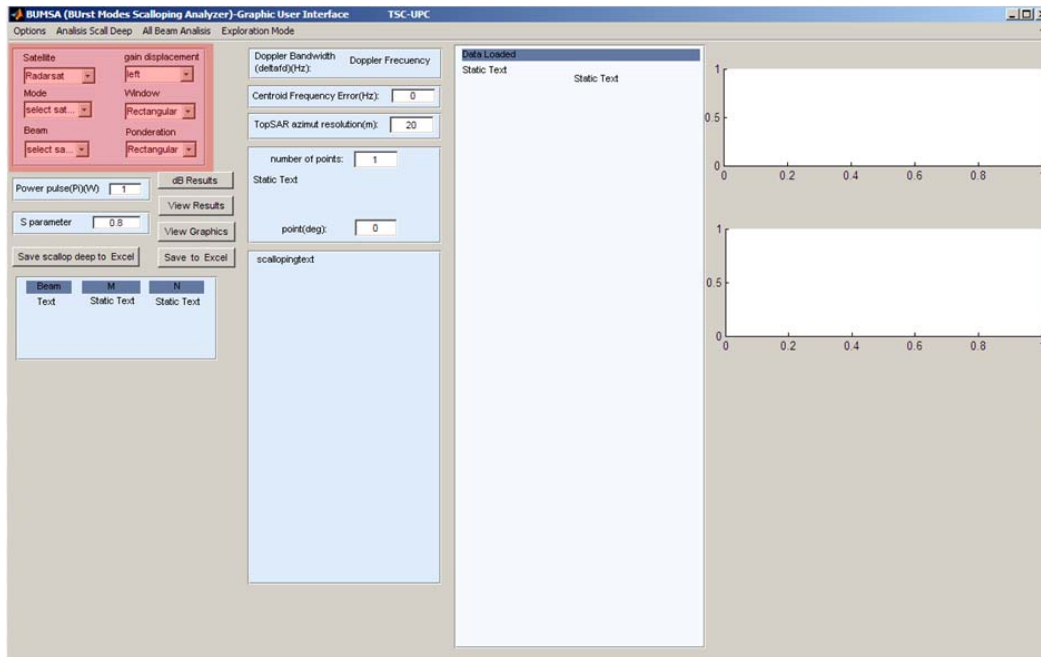
Esta opción sólo es útil para el satélite Paz y permite seleccionar entre el modo de exploración ScanSAR o TopSAR. La implementación de la aplicación en el modo ScanSAR se ha desarrollado a partir de la referencia [7.2] mientras que la implementación en el modo TopSAR se ha desarrollado a partir de las referencias [7.3] y [7.4].

Para el caso de Radarsat y Envisat la ejecución de la aplicación en modo TopSAR puede producir errores.

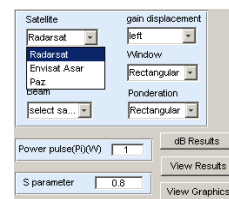


### 7.3. Descripción del subpanel izquierdo-superior

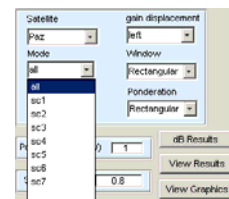
En esta sección se detallan las opciones internas de la aplicación, que son *Satelite*, *Mode*, *Beam*, *gain displacement*, *window* y *Ponderation*



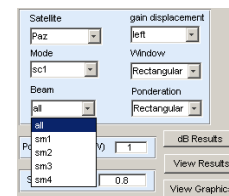
La opción *Satelite* permite seleccionar con cuál de los tres satélites Radarsat, Envisat o Paz se desea trabajar.



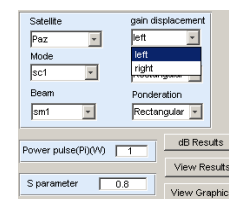
La opción *Mode* permite seleccionar el modo o secuencia de beams y se actualiza al seleccionar el satélite.



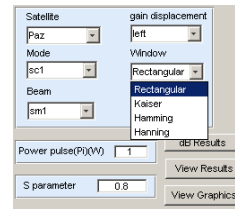
La opción *Beam* permite seleccionar el beam y se actualiza al seleccionar el modo del satélite



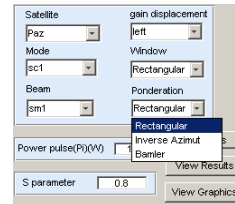
La opción *gain displacement* permite seleccionar el signo del error de Doppler centroid. Left correspondería con un error negativo y right con error positivo.



Con la opción *Window* se define la ventana que será empleada y se puede seleccionar entre *Rectangular*, *Kaiser*, *Hamming* o *Hanning*



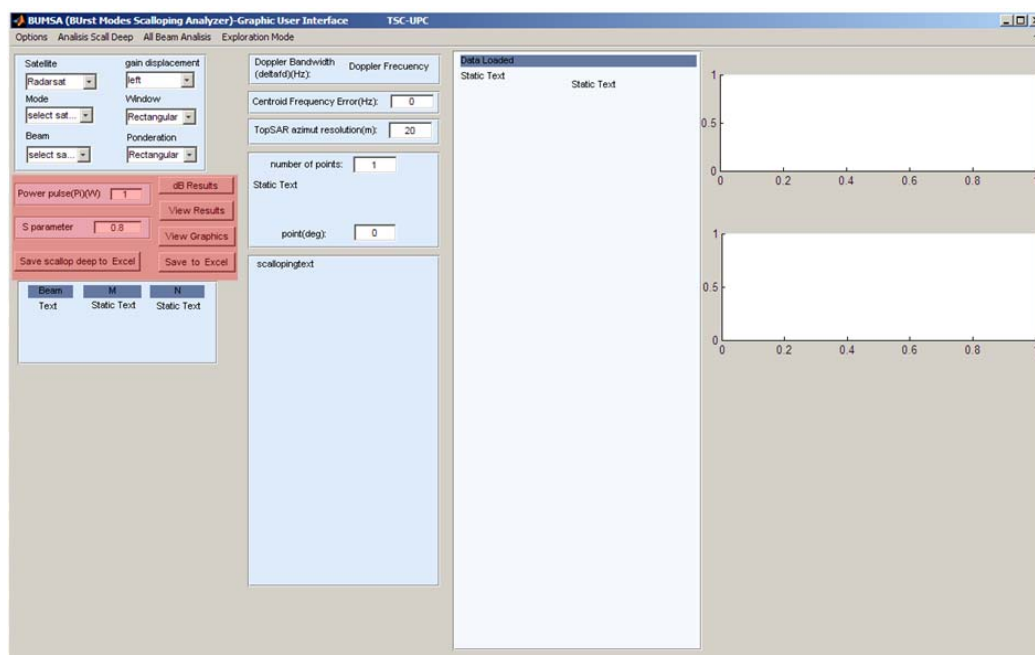
La opción *Ponderation* permite seleccionar la ponderación que será empleada. Las opciones disponibles son ponderación rectangular (*Rectangular*), inverso del diagrama de ganancia en acimut (*Inverse Azimut*) o método de Bamler (*Bamler*). En el caso de Radarsat y Envisat se



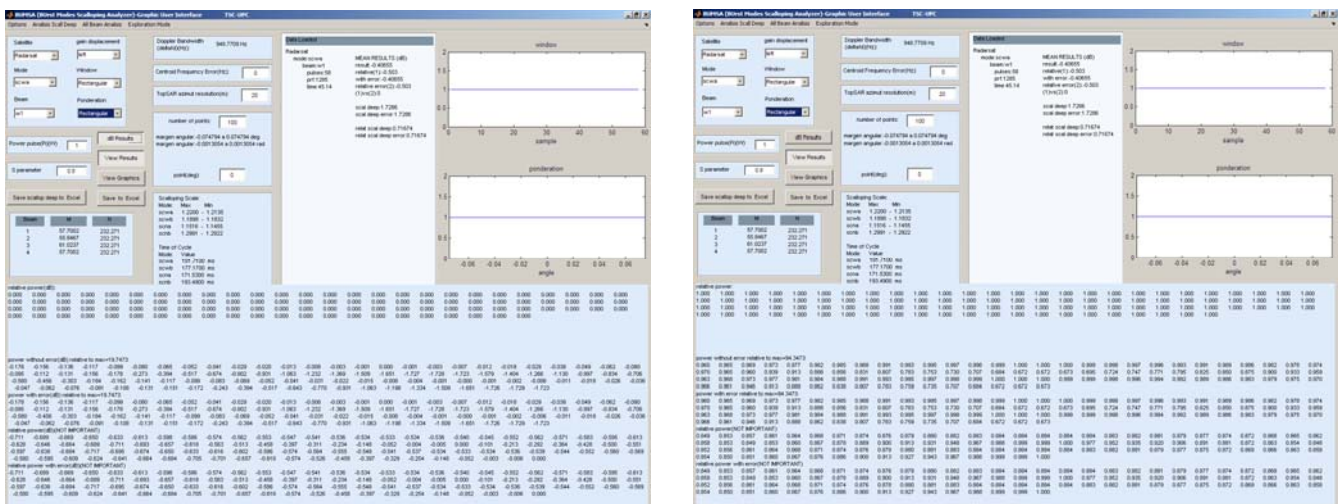
puede seleccionar cualquiera de las tres opciones mientras que para el caso de Paz solamente Rectangular e Inverse Azimut son utilizadas y el seleccionar Bamler podría producir un error de ejecución. Para el caso de TopSAR en Paz cualquiera de las tres opciones proporciona el mismo resultado al sólo utilizarse la ponderación rectangular. Además al seleccionar esta opción se activa la ejecución del proceso de cálculo.

#### 7.4. Descripción del subpanel izquierdo-intermedio

Las próximas opciones detalladas son los botones *dBResults*, *View Results*, *View Graphics*, *Save to Excel*, *Save scallop deep to Excel*, y los campos de escritura *Power Pulse* y *S parameter*



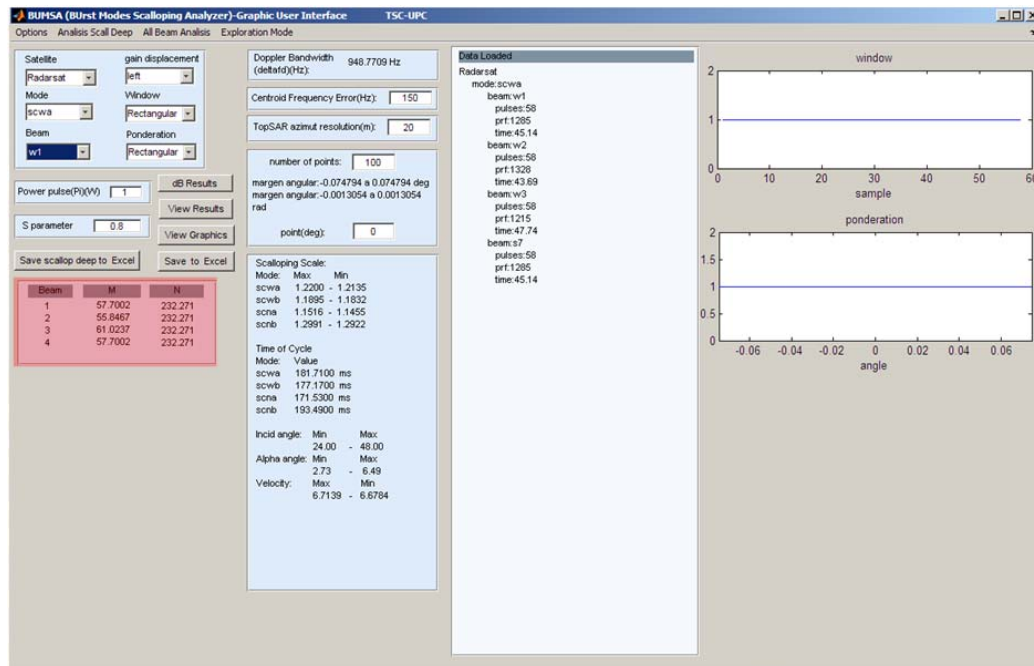
- En el campo de escritura *S parameter* se define el valor del parámetro S para el cálculo de los coeficientes del método Bamler (ref. [7.1]).
- El campo *Power Pulse* define el valor de la potencia de pico de los pulsos transmitidos. El valor especificado aquí no tiene transcendencia en el cálculo del scalping siempre que este sea distinto de cero ya que el scalping es una medida relativa de potencia.
- El boton pulsable *dBResults* permite decidir si los resultados mostrados en el panel inferior, estando la opción *View Results* activada, se muestran en valor lineal o en dB.



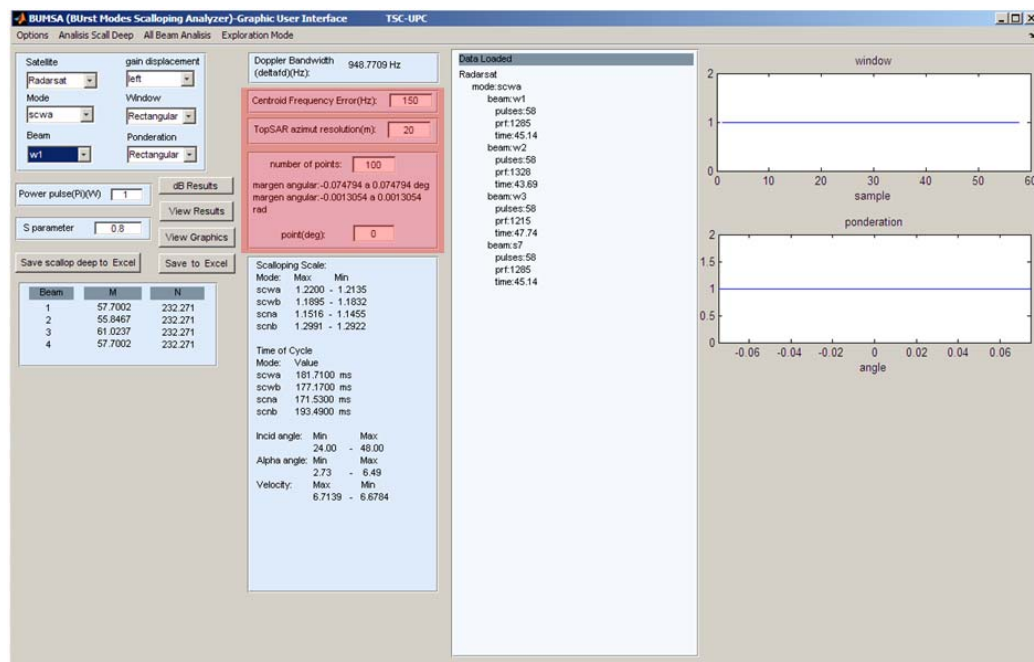
- El botón *View Results* activa o desactiva la visibilidad del panel inferior de resultados
- La opción *View Graphics* activa la visibilidad de las gráficas y de las posibles animaciones creadas por el programa. Además al pulsarse este botón se cierran de forma automática las ventanas de gráficas que estén abiertas a excepción de la aplicación principal y la ventana de Matlab, cosa muy útil si se desean cerrar de forma rápida, aún más si se trabaja con el sistema operativo Windows 7®.
- Con la opción *Save to Excel* se guardan en un archivo Excel los resultados obtenidos por el programa para el cálculo del perfil de scalping, detallando dicho archivo información como Satélite, modo, beam, ventana, ponderación, error de centroid, resultados en dB con y sin error, absolutos y relativos, y profundidad de scalping
- La opción *Save scallop deep to Excel* solo es útil cuando se selecciona un análisis de profundidad de scalping del menú superior *Analisis Scall Deep* y guarda en un fichero Excel los resultados de profundidad de scalping con y sin error de Doppler centroid calculados para la ponderación seleccionada.

## 7.5. Descripción del subpanel izquierdo-inferior

El cuadro de texto inferior proporciona el número de pulsos medio por cada beam (M) y para el modo (N) como se detalla en la referencia [7.2]



## 7.6. Descripción del subpanel central-izquierdo



Los siguientes campos que se detallan son:

- *Centroid Frequency Error*: permite seleccionar de forma numérica el valor del error de frecuencia Doppler del centroid.

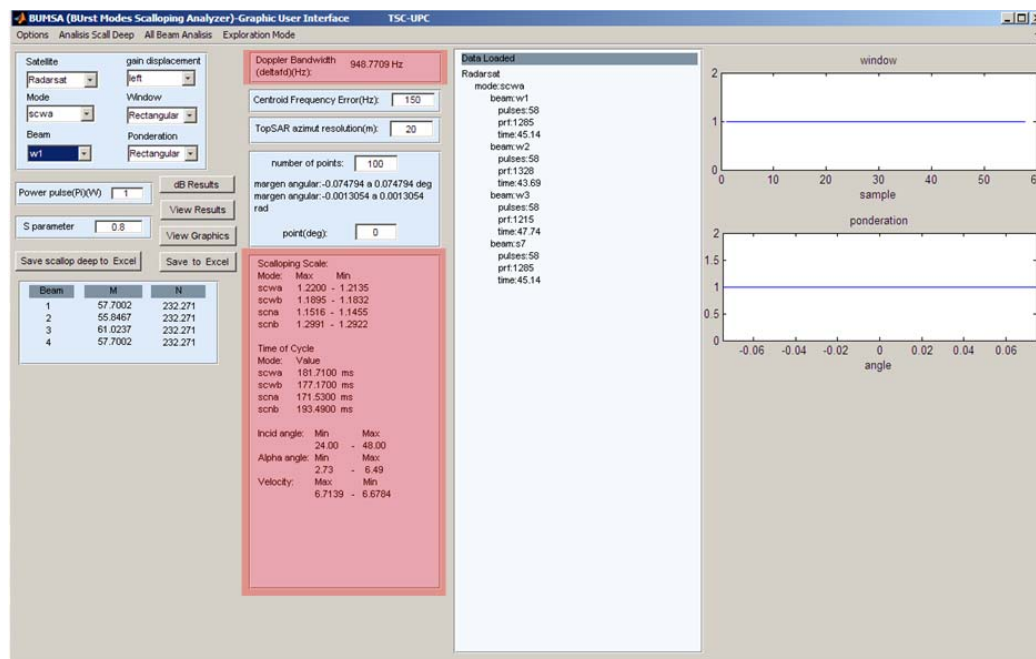
· *TopSAR azimuth resolution*: permite definir el valor de resolución en acimut con que se desea trabajar en el modo TopSAR.

· *number of points*: permite definir el número de puntos en los que se desea calcular el valor de scalping. Si se escribe un número, los valores angulares se calculan de forma equidistante dentro del ancho de haz del diagrama de ganancia. Si se escribe en texto *all* se emplea un número de puntos tres veces superior a la longitud del vector del diagrama de ganancia en ScanSAR o para todos los puntos en el caso de TopSAR, desplazando en ambos casos el tren de pulsos muestra a muestra.

La opción 'all' es la más fiable y recomendable aunque es la que emplea un tiempo mayor.

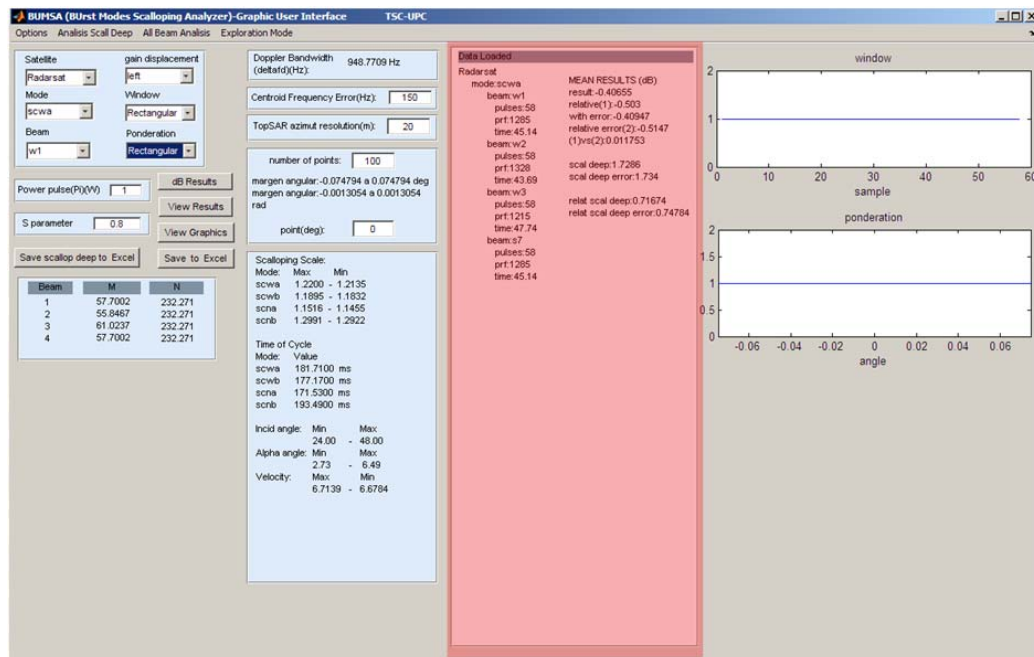
· *point*: permite definir el valor angular en grados del punto que se desea estudiar en el caso que la opción *number of points* tenga un valor de 1.

En este subapartado de la aplicación también se proporciona el valor del ancho de haz del diagrama de ganancia en grados y en radianes.



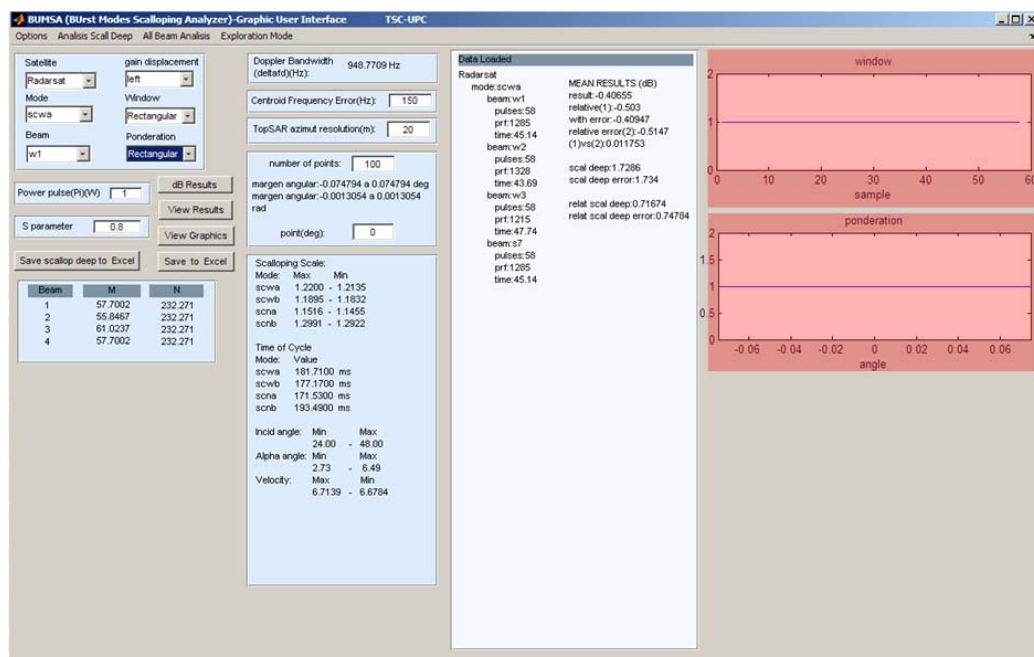
El campo *Doppler Bandwidth* proporciona el valor del ancho de banda Doppler, calculado mediante la ecuación (2.10) del capítulo 2, mientras que en el cuadro inferior se proporcionan valores como la distancia entre líneas de scalping, tiempo de ciclo, ángulo de incidencia y velocidad del blanco cuyos cálculos también se detallan en el capítulo 2.

## 7.7. Descripción del subpanel de resultados central-derecho



El cuadro central proporciona información del beam, como PRF o número de pulsos, y resultados medios obtenidos.

## 7.8. Descripción de panel de graficas derecho



Las dos graficas de la derecha corresponden con la ventana y la ponderación seleccionadas.



### **7.9. Referencias**

[7.1]: “Optimum Look Weighting for Burst-Mode and ScanSAR Processing”; Richard Bamler

[7.2]: “Modelling SAR scalloping in burst mode products from Radarsat-1 and Envisat”; RK Hawkins, PW Vachon

[7.3]: “TOPS Imaging With TerraSAR-X: Mode Design and Performance Analysis”, Adriano Meta, Josef Mittermayer, Pau Prats, Rolf Scheiber, Ulrich Steinbrecher

[7.4]: “Analysis and evaluation of Terrain Observation by Progressive Scans (TOPSAR) mode in Synthetic Aperture Radar”; Josep Ruiz Rodón; Antoni Broquetas Ibars; ETSETB-UPC

---

## **ANEXOS**



## **Anexo 1: Principales misiones en funcionamiento que emplean tecnología SAR**

### **TecSAR (TechSAR/Polaris)**

Satélite de reconocimiento israelí desarrollado por Elta Systems en Israel Aerospace Industries, quien lo controla. TecSAR -1 fue lanzado en enero de 2008 desde India, desde donde se pueden alcanzar orbitas inalcanzables desde Israel, y está situado en una órbita a 580 km con un periodo orbital de 90 minutos.

Utilizado por militares para reconocimiento de terreno y operaciones militares en los terrenos montañosos de Azerbaiyán mediante acuerdos de colaboración entre ambos países, entre otras aplicaciones.

Para 2011 está previsto que se lance TecSAR-2

<http://en.wikipedia.org/wiki/TecSAR>

[http://www.skyrocket.de/space/doc\\_sdat/techsar-1.htm](http://www.skyrocket.de/space/doc_sdat/techsar-1.htm)



### **RISAT-2 (Radar Imaging Satellite 2)**

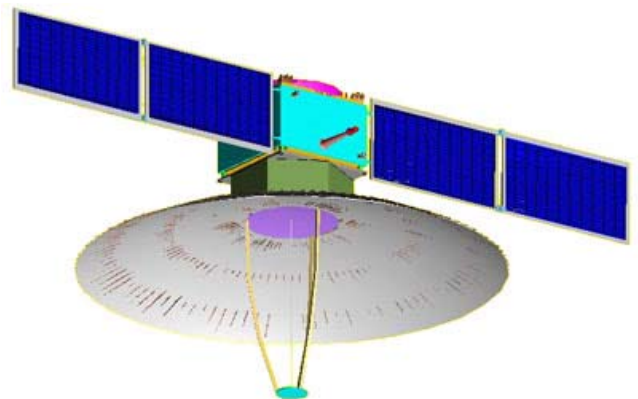
Satélite radar de tipo SAR indio que forma parte del programa RISAT y está basado en TecSAR. Fue lanzado en abril de 2009. Diseñado por ISRO (Indian Space Research Organisation), cuyo sensor primario SAR fue diseñado por Israel Aerospace Industries.

Su peso es de 300 kg, inclinación de 41°, altura de 550 km, periodo orbital 90 min y órbita helio sincrónica.

Entre sus aplicaciones se encuentra la monitorización de desastres naturales, además de otras de orientación militar.

<http://www.isro.org/satellites/RISAT-2.aspx>

<http://en.wikipedia.org/wiki/RISAT-2>



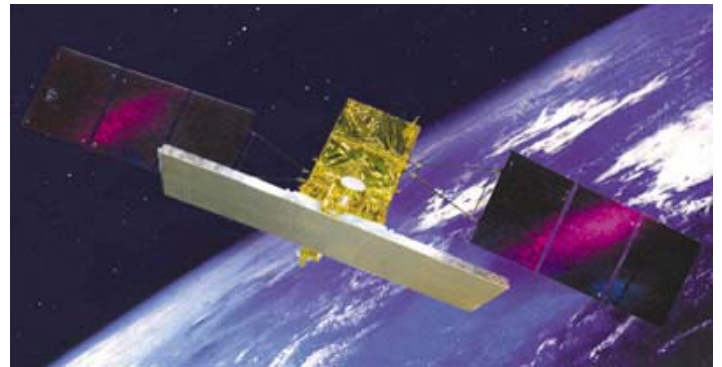
### **COSMO-SkyMed (Constellation of small Satellites for the Mediterranean basin Observation)**

Constelación de satélites radar financiada por el Ministerio Italiano de Investigación, Ministerio de Defensa y la Agencia Espacial Italiana (ASI).

Está formada por 4 satélites de tamaño medio con sensores SAR que dan cobertura mundial, lo que permite realizar diversas observaciones diarias bajo cualquier condición meteorológica.

Los 4 satélites se sitúan en una órbita helio síncrona a una altura de 619 km y un periodo de 97 minutos. Fueron lanzados los tres primeros (COSMO 1-3) en junio de 2007, diciembre de 2007, octubre de 2008, mientras que COSMO-4 fue finalmente lanzado el 05 de noviembre de 2010.

Sus aplicaciones son tanto civiles como militares dentro y fuera de Italia, entre las que se encuentra análisis de seísmos, monitorización de desastres medioambientales o mapeado de campos agrícolas.



<http://www.cosmo-skymed.it>

<http://en.wikipedia.org/wiki/COSMO-SkyMed>

### **SAR-Lupe**

(Lupe =lupa; en alemán)

Programa alemán formado por una constelación de 5 satélites desarrollados por la empresa aeroespacial OHB-System, que además controla el sistema y analiza los datos, con la colaboración de German Ministry of Defense (BMVg) y la Federal Office of Defense Technology and Procurement

Los satélites (SAR-Lupe-1, SAR-Lupe-2, SAR-Lupe-3, SAR-Lupe-4, SAR-Lupe-5) fueron lanzados en diciembre 2006, julio 2007, noviembre 2007, marzo de 2008, julio de 2008 y tienen un peso de 770 kg y orbitan a aproximadamente 500 km de distancia.



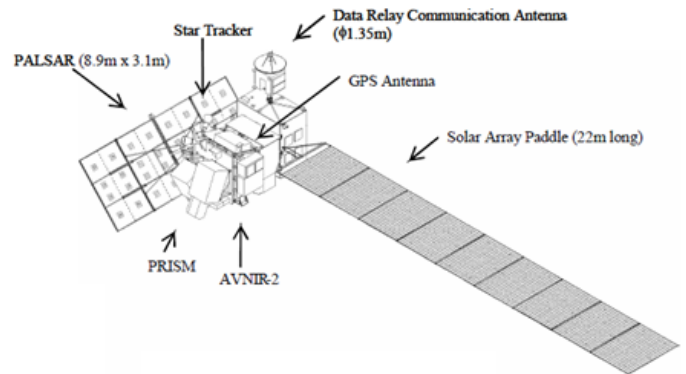
<http://en.wikipedia.org/wiki/SAR-Lupe>

<http://www.ohb-system.de/gb/Security/sarlupe.html>

### **ALOS / Daichi**

Satélite japonés con un peso de 4000 kg, lanzado en enero de 2006 y desarrollado por JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency). Está formado por tres sensores, Panchromatic Remote-sensing Instruments for Stereo Mapping (PRISM), Advanced Visible and Near Infrared Radiometer type 2 (AVNIR-2), y Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar (PALSAR). Su órbita está a 691.65 km de distancia y es de tipo helio síncrona.

Sus principales aplicaciones son explotadas por los ministerios gubernamentales Japoneses como el Ministerio de Tierra, Infraestructuras y Transporte, Ministerio de Agricultura, forestal y pesca, Ministerio de Medioambiente, Instituto de vigilancia geográfica, guarda costera, además de posibles clientes extranjeros



[http://en.wikipedia.org/wiki/Advanced\\_Land\\_Observation\\_Satellite](http://en.wikipedia.org/wiki/Advanced_Land_Observation_Satellite)

<http://www.isprs.org/proceedings/XXXV/congress/comm1/papers/57.pdf>

### **Yaogan /JB**

Programa de satélites chinos desarrollados por Shanghai Academy of Space Flight Technology (SAST) con el control de China Aerospace Science and Technology Corporation(CASC).

Sus aplicaciones son científicas, de posicionamiento terrestre, monitorización de desastres y militares.



Nombre	Nombre militar	lanzamiento	órbita	tipo
Yaogan 1	JB-5-1	Abril 2006	635-637 km, 97.9°	SAR
Yaogan 2	JB-6-1	Mayo 2007	639-663 km, 97.9°	Óptico
Yaogan 3	JB-5-2	Noviembre 2007	635-637 km, 97.8°	SAR
Yaogan 4	JB-6-2	Diciembre 2008	642-660 km, 97.9°	Óptico
Yaogan 5	JB-8-1	Diciembre 2008	494-501 km, 97.3°	SAR
Yaogan 6	JB-7-1	Abril 2009	518-519 km, 97.6°	Óptico
Yaogan 7	JB-6-3	Diciembre 2009	630-666 km, 97.8°	Óptico
Yaogan 8	Desconocido	Diciembre 2009	1200-1212 km, 100.5°	Desconocido
Yaogan 9 A/B/C	Desconocido	Marzo 2010	1089-1107 km, 63.4° (Yaogan 9C)	ELINT*
Yaogan 10	desconocido	Agosto 2010		

\*ELINT (ELectronic INTelligence): adquisición de información de tipo electromagnética, normalmente proveniente de sistemas electrónicos de defensa rival como radares, sistemas de misiles, aeronaves, etc.

[http://space.skyrocket.de/doc\\_sdat/yaogan-1.htm](http://space.skyrocket.de/doc_sdat/yaogan-1.htm)

<http://en.wikipedia.org/wiki/Yaogan>

## **ERS1 y 2**

Satélites europeos lanzados en julio de 1991 y abril de 1995.

### **ERS1**

Su órbita se sitúa a 785 km y es de tipo helio síncrona.

Entre sus instrumentos se encuentran un altímetro radar en banda Ku, radiómetro infrarrojo para medir temperatura del mar y las nubes, emisor de microondas, radar SAR y escaterometro para el estudio del viento.

Dejo de funcionar en marzo de 2000 debido a un fallo del ordenador y de los giroscopios

### **ERS2**

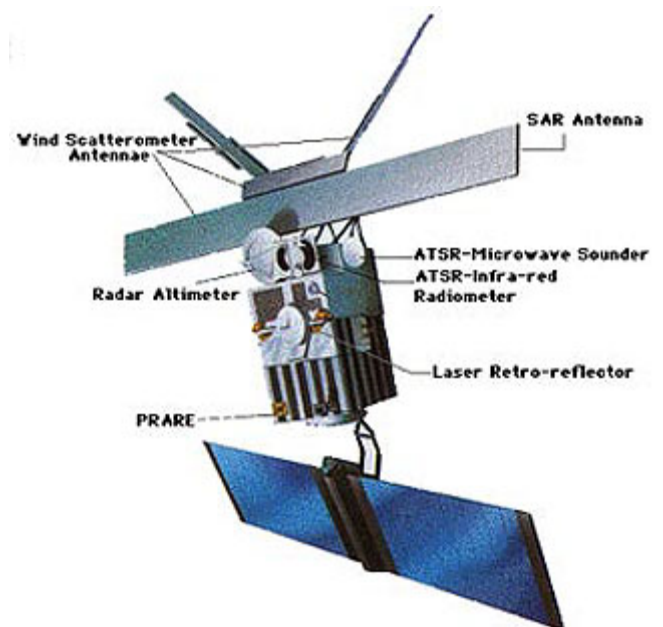
Añade a ERS1 un sistema GOME (Global Ozone Monitoring Experiment) y un espectrómetro de absorción. Se sitúa en la misma órbita que ERS1 separado de este en 1 día en tierra, por lo que durante un tiempo trabajaron en tándem.

Desde 2001 opera sin giroscopios lo que degrada los datos y en 2003 un fallo a bordo provocó que las zonas en que el satélite era operativo se modificasen.

Se considera a Envisat como su sucesor

[http://es.wikipedia.org/wiki/European\\_Remote\\_Sensing\\_Satellite](http://es.wikipedia.org/wiki/European_Remote_Sensing_Satellite)

<http://earth.esa.int/ers/>





### **Envisat ASAR ("Environmental Satellite")**

Programa espacial europeo perteneciente a la ESA cuyo satélite fue lanzado en marzo de 2002. Con un coste de 2.3 billones de euros fue el programa más importante de observación terrestre hasta 2006.

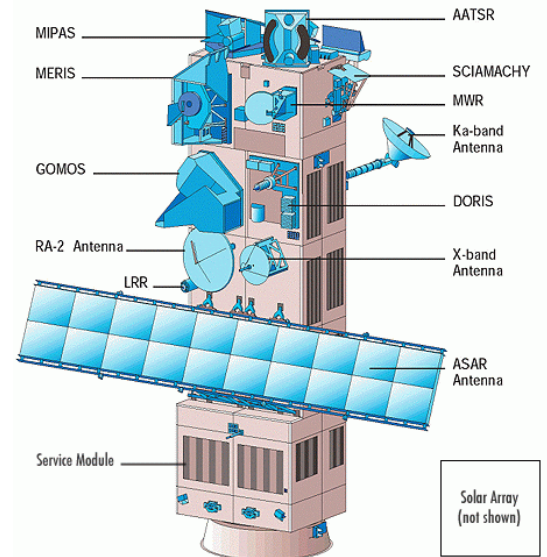
Su órbita está situada a 790 km y es de tipo helio síncrona polar. Realiza una vuelta a la Tierra en 101 minutos y su ciclo de repetición es de 35 días. Tiene una masa de 8500 kg. Su objetivo es proporcionar información medioambiental como por ejemplo química atmosférica, ozono, biología oceanográfica, viento marítimo, humedad, agricultura, desastres naturales, modelado de terreno, monitorización de tráfico marítimo, polución, cartografía, estudio del hielo,..., para lo que dispone de un alto número de instrumentos:

*MERIS* (MEdium Resolution Imaging Spectrometer);  
*AATSR* (Advanced Along Track Scanning Radiometer);  
*GOMOS* (Global Ozone Monitoring by Occultation of Stars);

*SCIAMACHY* (SCanning Imaging Absorption spectroMeter for Atmospheric CHartography); *ASAR* (Advanced Synthetic Aperture Radar); *RA-2* (Radar Altimeter 2)

*MWR* (Microwave Radiometer); *DORIS* (Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite); *MIPAS* (Michelson Interferometer for Passive Atmospheric Sounding);

El instrumento *ASAR* opera en banda C (4 a 8 GHz) y permite la observación del terreno mediante diversos modos y diversas polarizaciones.



Modo	Id	Polarización	incidencia	resolución	swath
Alternating polarisation	AP	HH/VV,HH/HV,VV/VH	15-45°	30-150 m	58-110 km
Image	IM	HH, VV	15-45°	30-150 m	58-110 km
Wave	WV	HH, VV		400 m	5×5 km
Suivi global (ScanSAR)	GM	HH, VV		1 km	405 km
Wavescan (ScanSAR)	WS	HH, VV		150 m	405 km

[http://www.naturalsciences.be/institute/structure/geology/gsb\\_website/research/satellite/satellite](http://www.naturalsciences.be/institute/structure/geology/gsb_website/research/satellite/satellite)

<http://mtp.jpl.nasa.gov/missions/envisat/envisat.html>

<http://en.wikipedia.org/wiki/Envisat>

## **Radarsat 2**

Satélite lanzado en diciembre de 2007 propiedad de MDA y de la Agencia Espacial Canadiense. Su órbita es de tipo helio síncrona, tiene un periodo de 100.7 minutos y un ciclo de repetición de 24 días. Emplea una frecuencia en banda C (5.405 GHz.)

Está situado en la misma órbita que RadarSat 1, separado de este en medio periodo, lo que en tierra se traduce en una separación de unos 12 días.

Dispone de un instrumento SAR que le permite realizar barridos en diferentes combinaciones de polarización y modos de exploración como ScanSAR, Spotlight o StripMAP. Su resolución máxima se sitúa entre los 1 y los 3 metros en modo Spotlight. En el modo ScanSAR Wide Beam el ancho de swath es de 500 km con una resolución de 100 m. Su capacidad de visión lateral le permite obtener información de la zona antártica muy útil para estudios medioambientales.

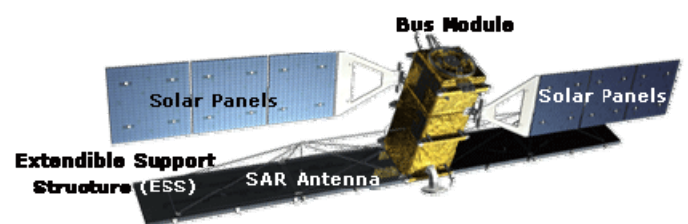
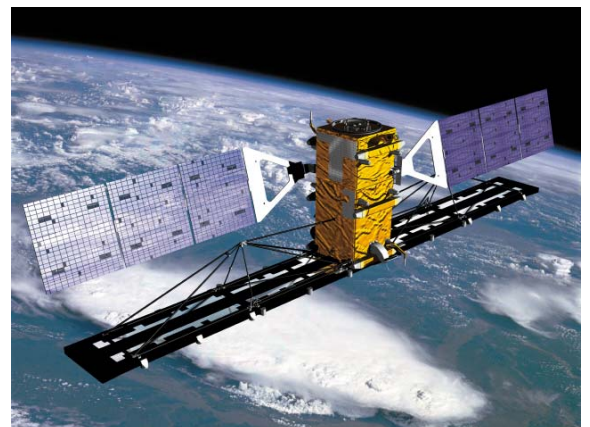
Los contratistas encargados del montaje fueron MacDonald Dettwiler and Associates (MDA), EMS Technologies, Alenia, mientras que Kongsberg Spacetec de Noruega provee servicios en tierra.

Entre sus aplicaciones se encuentran el mapeado de hielo, detección de rutas de barcos, monitorización de campos agrícolas, vigilancia marítima para detección de barcos y polución, vigilancia terrestre, identificación de blancos, mapeado geológico, topografía, etc...

En 2009 el Departamento de Defensa Nacional de Canadá anuncio un programa de vigilancia de la línea costera de Canadá y el Ártico mediante Radarsat, con lo que el satélite sería mejorado por MDA para detectar barcos y vertidos de sustancias contaminantes.

<http://en.wikipedia.org/wiki/Radarsat-2>

<http://www.radarsat2.info/about/mission.asp>



## **Paz**

ECE Paz está basando su diseño en TerraSAR-X tanto en fabricación como en aplicaciones, salvo en algunos cambios.

## **TerraSAR-X**

Satélite alemán que incorpora un instrumento SAR que opera en banda X (9.65 GHz). Desarrollado por la agencia espacial alemana (DLR), Astrium y el ministerio de educación y ciencia alemán (BMBF). Los derechos de explotación comercial pertenecen a Astrium, mediante su filial Infoterra, mientras que los derechos de explotación científica a DLR.

Fue lanzado en junio de 2007 y está situado en una órbita helio síncrona a una distancia de 515 km. El periodo de repetición es de 11 días y el periodo orbital es de 94,92 minutos.

Para determinar la posición orbital se emplean diversos sistemas GPS que producen un error inferior a los 3 metros. El satélite incorpora un reflector laser y un star tracker además de sistemas de control de altitud, de órbita y de estabilidad de fase de gran precisión.

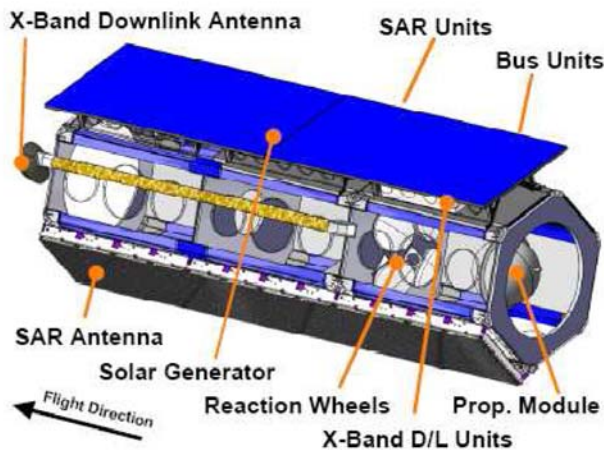
Sus modos de exploración alcanzan una resolución de hasta 1 metro con diferentes combinaciones de polarización (HH, VV, HV, VH) mediante un sistema de antena DRA (Dual Receive Antenna) que permite configurar la antena de manera que una mitad de la antena reciba señales en polarización vertical y otra en horizontal pudiendo medir al mismo instante una polarización lineal y una cruzada (HH-HV ó VV-VH).

Dispone de capacidad de análisis multitemporal para analizar la misma área en diferentes instantes, por ejemplo para estudiar el comportamiento del tráfico durante distintos días de la semana.

Incorpora una antena phased array que lo dota de control total sobre el haz de radiación, lo que posibilita poder seleccionar entre 4 modos de exploración en tiempo real y dota a TerraSAR-X de la posibilidad de tomar desde imágenes de escenas pequeñas con alta resolución hasta escenas grandes con baja resolución, y dispone de una antena desplegable de 3.3 metros de largo que transmite en banda X para el enlace de bajada de datos.

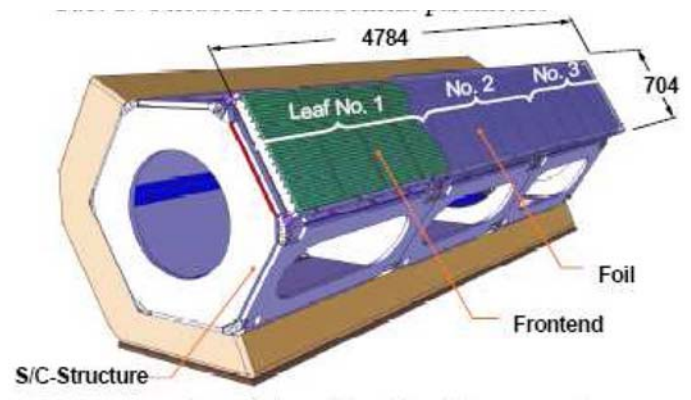
Entre las aplicaciones científicas se encuentran análisis de hidrología, geología, climatología, oceanografía, monitorización medioambiental, de desastres naturales (como la prevención de terremotos), cartografía, análisis de comportamiento del tráfico rodado y detección de barcos.

La estructura del satélite sigue el modelo de Flexbus desarrollado por Astrium en la misión GRACE de la NASA. En la siguiente figura se puede observar el satélite con un detalle de sus módulos:

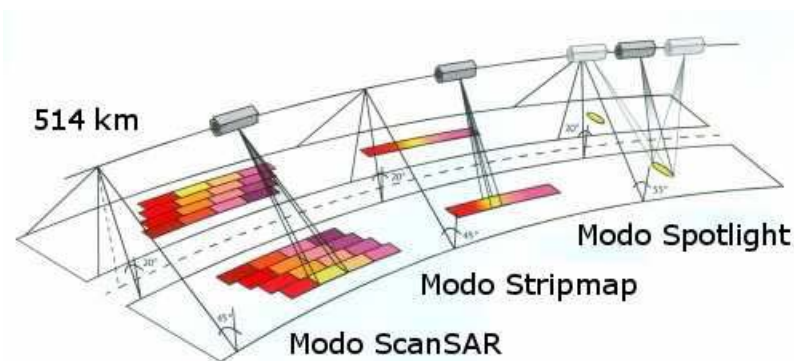


Sus medidas son 4.88 metros por 2.4 metros, tiene una masa de 1230 kilos y su tiempo de vida esperado es de 5 años

La antena está formada por 3 hojas con 4 paneles por hoja. Cada panel está formado por 32 subarrays, en total son 384 subarrays de polarización dual.



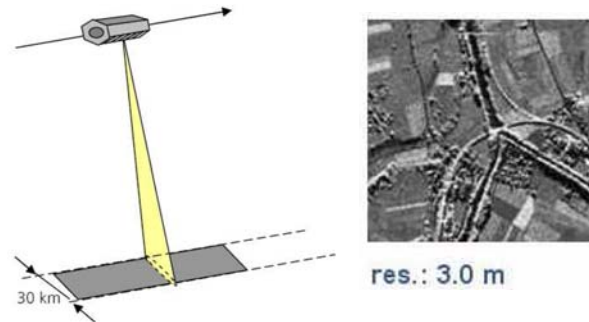
Los modos de exploración que dispone son ScanSAR, StripMAP, Spotlight y TopSAR





### Modo StripMAP

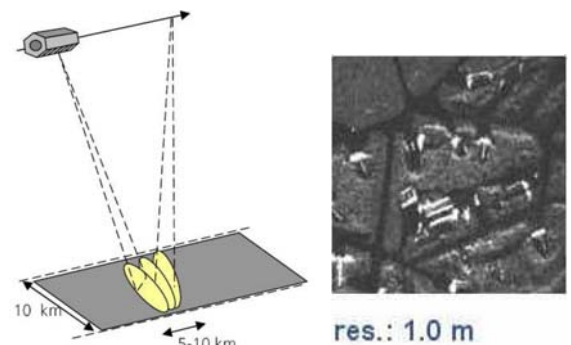
El swath se ilumina de forma continuada mientras el haz de la antena permanece con un ángulo fijado y el satélite se desplaza.



### Modo Spotlight

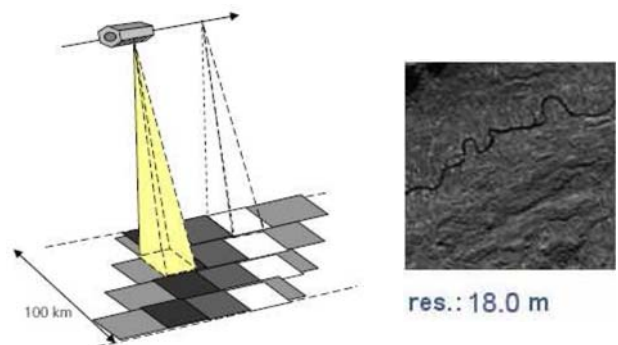
El ángulo del haz de antena varía en la dirección contraria al movimiento del satélite de manera que el swath quede aproximadamente fijo en tierra. Se obtiene así resoluciones de hasta 1 metro

Existen de este 2 variantes uno en que el swath queda fijado y se obtiene una resolución de 1 metro y un swath de 5x10 km y otro en que el swath se desplaza muy lentamente obteniendo una resolución de 2 metros con una escena de 10x10 km



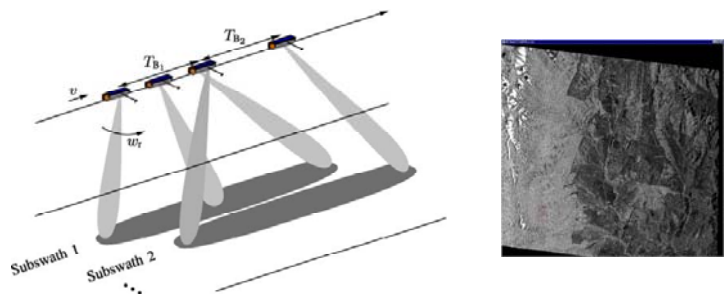
### Modo ScanSAR




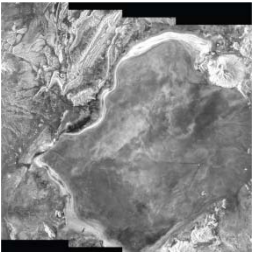
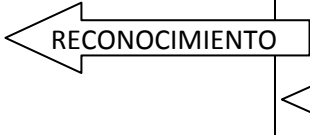
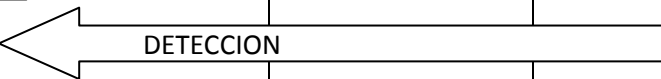
En este modo se conmuta el ángulo de incidencia en range o elevación de manera que se aumenta el área observada hasta los 100x150km con una resolución de alrededor de 16 metros.



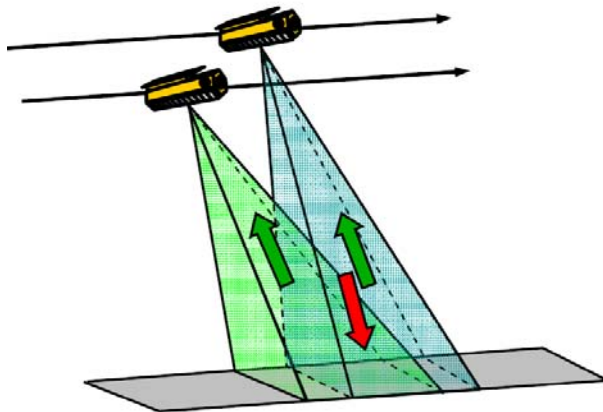
### Modo TopSAR

Este modo está diseñado para eliminar problemas derivados de ScanSAR como scalloping. Consiste en realizar una conmutación de ángulos tanto en acimut como en range a costa de obtener la imagen con una peor resolución.



Modo	Spotlight	StripMAP	ScanSAR	TopSAR
Resolución	1 m	3	16	Depende de steering rate
Tamaño de escena	10x5 km <sup>2</sup>	30X50 km <sup>2</sup>	100X150 km <sup>2</sup>	100X150 km <sup>2</sup>
polarización	Única, dual	Única, dual, cuadrática	única	única
capacidades	Reconocimiento de objetos (aviones de transporte, aviones de combate, barcos, etc.)	Detección de infraestructuras (carreteras, vías de tren y acueductos, etc.)	Detección de características de superficie (costa, barcos, etc.)	Detección de características de superficie (costa, barcos, etc.)
imagen				
				

Está previsto el lanzamiento de otro satélite igual para que ambos trabajen en tándem.



**Tandem-X**

<http://en.wikipedia.org/wiki/TerraSAR-X>

<http://www.imageryservices.com/TerraSAR-X.php>

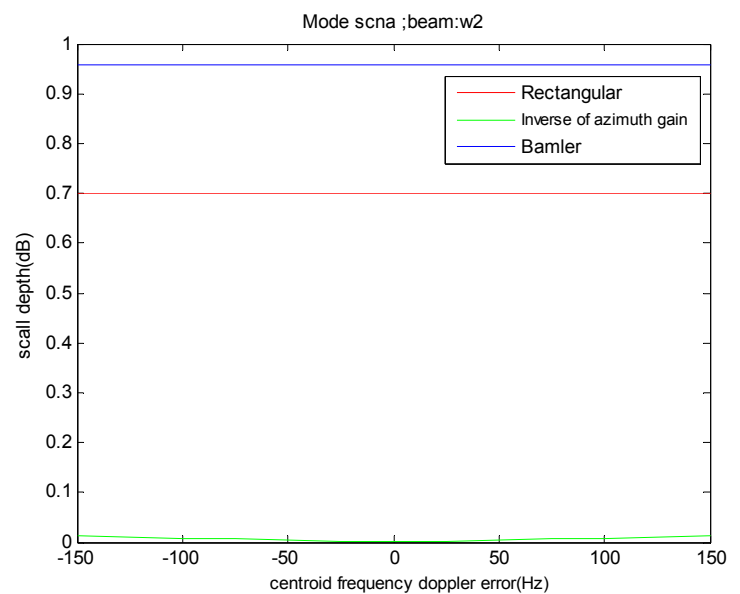
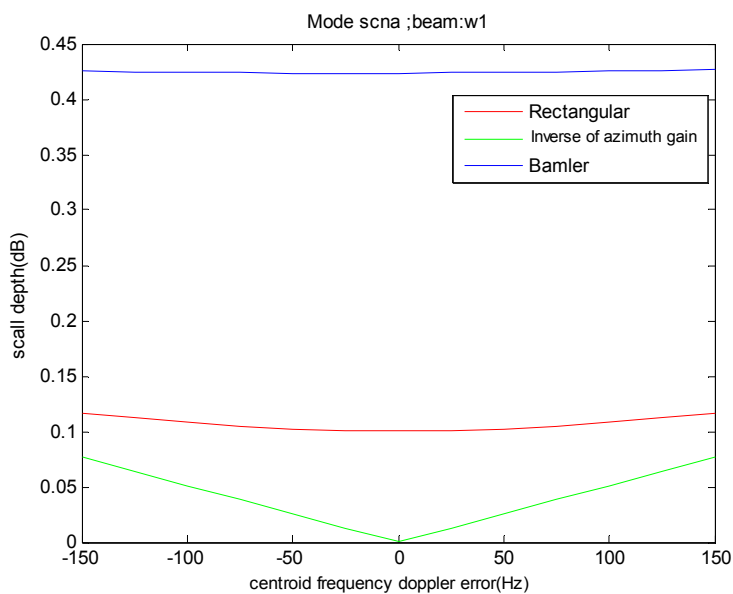
## Anexo 2: Profundidad de scalloping para todos los beams de Radarsat en ScanSAR

nota: todos los resultados están en dB

### MODE SCNA

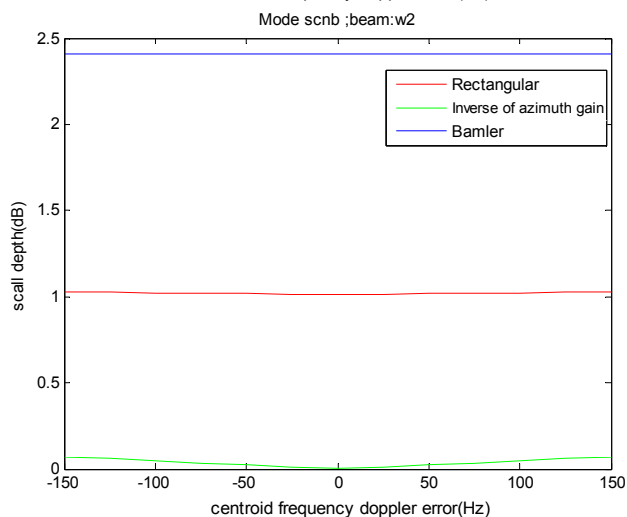
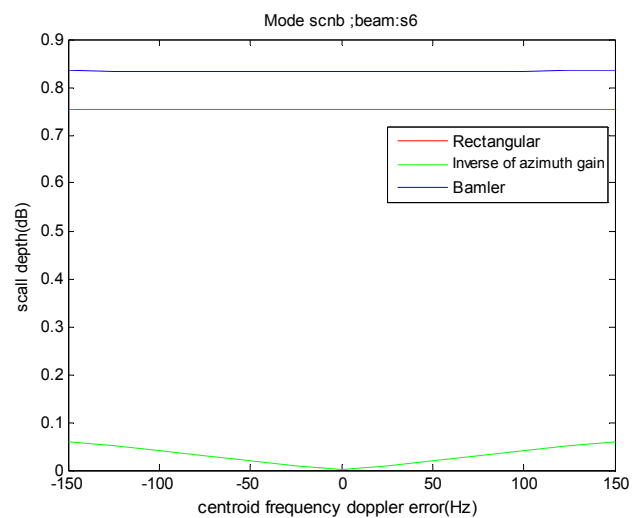
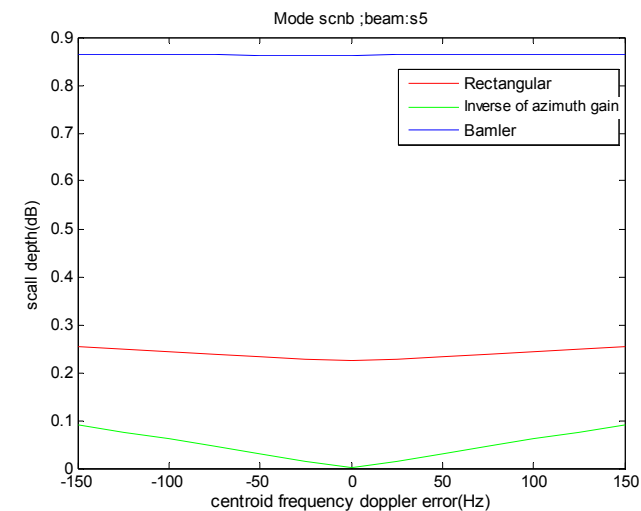
Scalloping Depth without error					
BEAM W1			BEAM W2		
Rectangular Method	Inverse Method	Bamler Method	Rectangular Method	Inverse Method	Bamler Method
0,100	1,93E-15	0,423	0,700	1,93E-15	0,957

Scalloping Depth with error						
Frec Error	BEAM W1			BEAM W2		
	Rectangular Method	Inverse Method	Bamler Method	Rectangular Method	Inverse Method	Bamler Method
-150	0,116	0,0766	0,425	0,700	0,0120	0,957
-125	0,112	0,0638	0,424	0,700	0,0100	0,957
-100	0,108	0,0510	0,424	0,700	0,0080	0,957
-75	0,104	0,0383	0,423	0,700	0,0060	0,957
-50	0,102	0,0255	0,423	0,700	0,0040	0,957
-25	0,101	0,0127	0,423	0,700	0,0020	0,957
0	0,100	1,93E-15	0,423	0,700	1,93E-15	0,957
25	0,101	0,0127	0,423	0,700	0,0020	0,957
50	0,102	0,0255	0,424	0,700	0,0040	0,957
75	0,104	0,0383	0,424	0,700	0,0060	0,957
100	0,108	0,0510	0,425	0,700	0,0080	0,957
125	0,112	0,0638	0,426	0,700	0,0100	0,957
150	0,116	0,0766	0,427	0,700	0,0120	0,957



## MODE SCNB

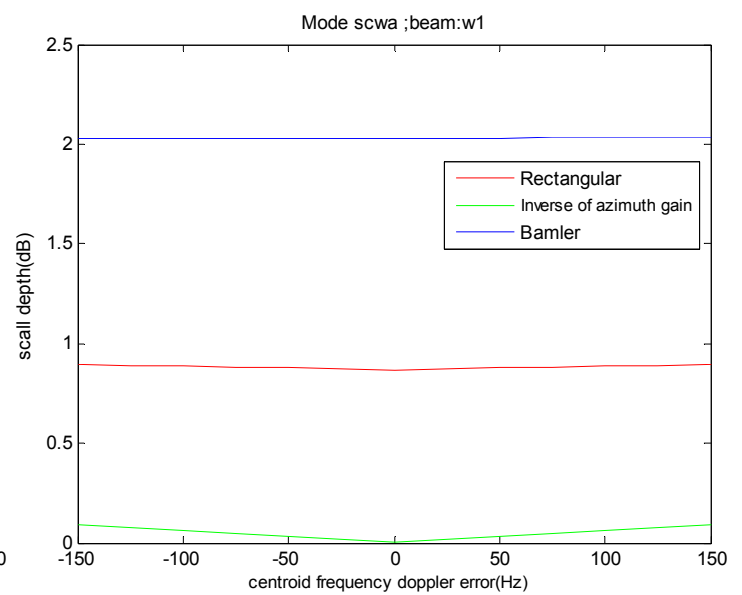
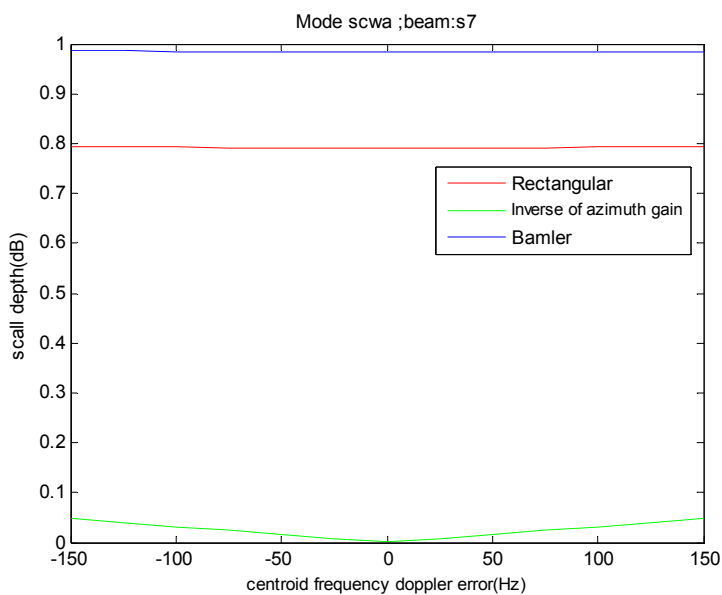
	BEAM S5			BEAM S6			BEAM W2		
Frec Error	Rectan Method	Inverse Method	Bamler Method	Rectan Method	Inverse Method	Bamler Method	Rectan Method	Inverse Method	Bamler Method
	Scallop Depth without error			Scallop Depth without error			Scallop Depth without error		
	0,223	2,4E-15	0,863	0,753	3,3E-15	0,831	1,010	1,9E-15	2,406
Frec Error	Scalloping Depth with error			Scalloping Depth with error			Scalloping Depth with error		
-150	0,253	0,0913	0,864	0,755	0,0601	0,834	1,028	0,0725	2,405
-125	0,248	0,0760	0,863	0,754	0,0501	0,833	1,025	0,0604	2,405
-100	0,243	0,0608	0,863	0,754	0,0401	0,832	1,022	0,0483	2,405
-75	0,238	0,0456	0,863	0,754	0,0300	0,832	1,019	0,0362	2,405
-50	0,233	0,0304	0,863	0,753	0,0200	0,831	1,016	0,0241	2,406
-25	0,228	0,0152	0,862	0,753	0,0100	0,831	1,013	0,0120	2,406
0	0,223	2,4E-15	0,863	0,753	3,3E-15	0,831	1,010	1,9E-15	2,406
25	0,228	0,0152	0,863	0,753	0,0100	0,831	1,013	0,0120	2,406
50	0,233	0,0304	0,863	0,753	0,0200	0,832	1,016	0,0241	2,406
75	0,238	0,0456	0,863	0,754	0,0300	0,832	1,019	0,0362	2,406
100	0,243	0,0608	0,864	0,754	0,0401	0,833	1,022	0,0483	2,406
125	0,248	0,0760	0,864	0,754	0,0501	0,834	1,025	0,0604	2,406
150	0,253	0,0913	0,865	0,755	0,0601	0,835	1,028	0,0725	2,406



## MODE SCWA

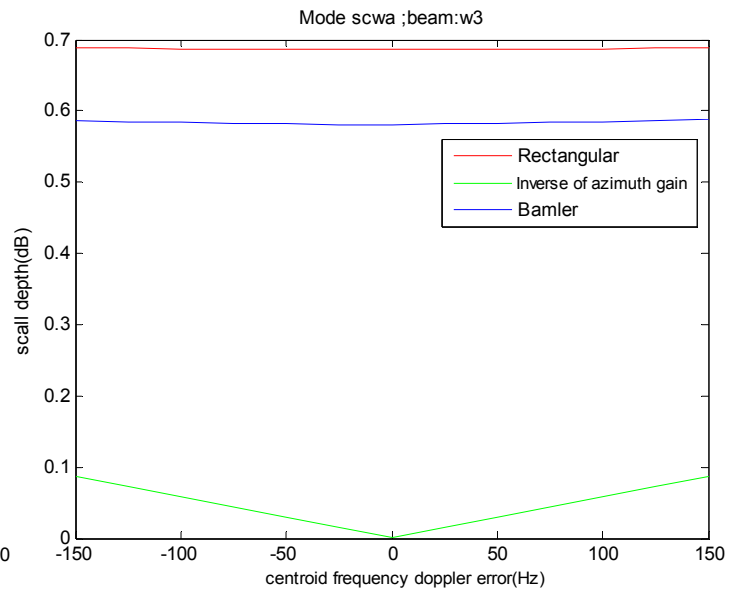
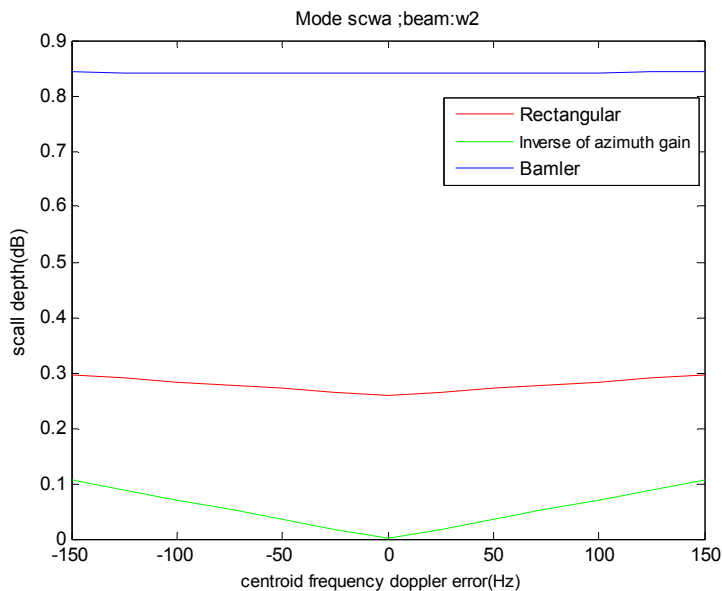
Scalloping Depth without error					
BEAM S7			BEAM W2		
Rectangular Method	Inverse Method	Bamler Method	Rectangular Method	Inverse Method	Bamler Method
0,790	2,41E-15	0,982	0,868	3,86E-15	2,031

Scalloping Depth with error						
BEAM S7				BEAM W1		
Frec Error	Rectangular Method	Inverse Method	Bamler Method	Rectangular Method	Inverse Method	Bamler Method
-150	0,794	0,0481	0,986	0,896	0,0946	2,031
-125	0,793	0,0401	0,985	0,891	0,0788	2,031
-100	0,792	0,0320	0,984	0,886	0,0631	2,031
-75	0,792	0,0240	0,984	0,882	0,0473	2,031
-50	0,791	0,0160	0,983	0,877	0,0315	2,031
-25	0,790	0,0080	0,983	0,872	0,0157	2,031
0	0,790	2,41E-15	0,982	0,868	3,86E-15	2,031
25	0,790	0,0080	0,982	0,872	0,0157	2,032
50	0,791	0,0160	0,982	0,877	0,0315	2,032
75	0,792	0,0240	0,982	0,882	0,0473	2,032
100	0,792	0,0320	0,983	0,886	0,0631	2,032
125	0,793	0,0401	0,983	0,891	0,0788	2,032
150	0,794	0,0481	0,984	0,896	0,0946	2,032



Scalloping Depth without error					
BEAM W2			BEAM W3		
Rectangular Method	Inverse Method	Bamler Method	Rectangular Method	Inverse Method	Bamler Method
0,259	2,41E-15	0,839	0,686	2,41E-15	0,581

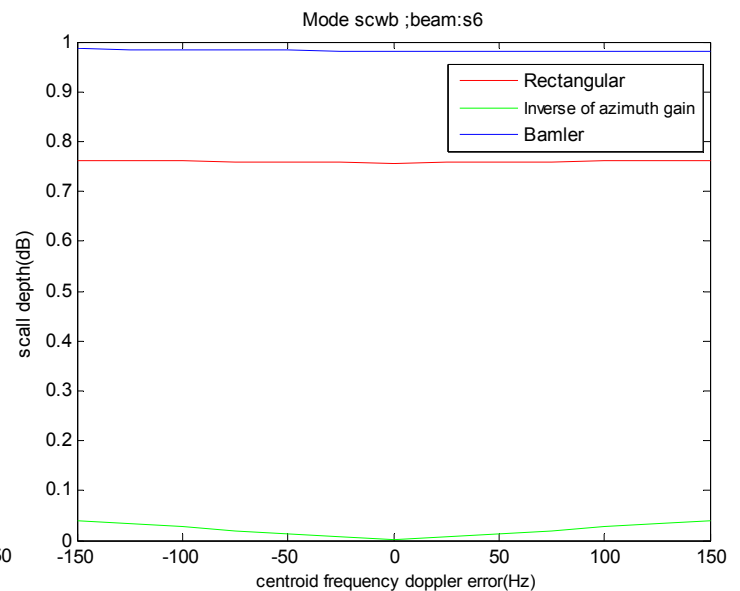
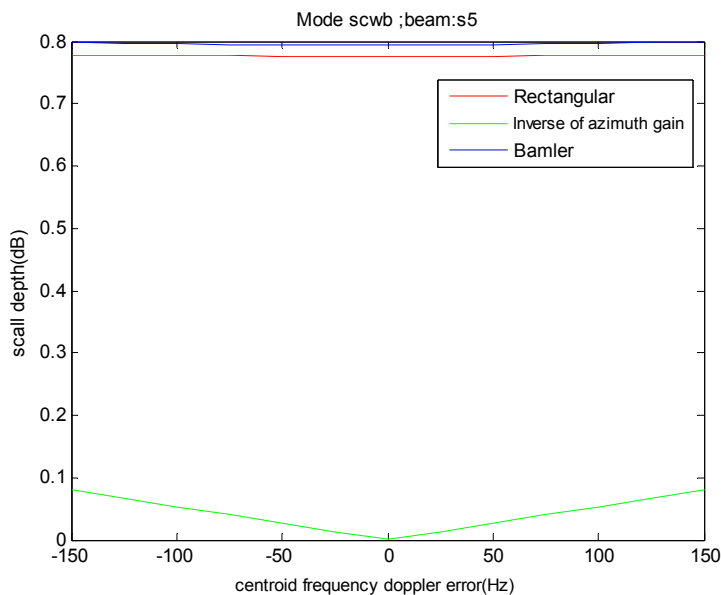
	Scalloping Depth with error					
	BEAM W2			BEAM W3		
Frec Error	Rectangular Method	Inverse Method	Bamler Method	Rectangular Method	Inverse Method	Bamler Method
-150	0,296	0,1061	0,842	0,688	0,0878	0,586
-125	0,289	0,0884	0,841	0,687	0,0732	0,584
-100	0,283	0,0707	0,840	0,687	0,0585	0,583
-75	0,277	0,0530	0,840	0,686	0,0439	0,582
-50	0,271	0,0353	0,839	0,686	0,0292	0,581
-25	0,265	0,0176	0,839	0,686	0,0146	0,581
0	0,259	2,41E-15	0,839	0,686	2,41E-15	0,581
25	0,265	0,0176	0,839	0,686	0,0146	0,581
50	0,271	0,0353	0,840	0,686	0,0292	0,582
75	0,277	0,0530	0,841	0,686	0,0439	0,583
100	0,283	0,0707	0,841	0,687	0,0585	0,585
125	0,289	0,0884	0,842	0,687	0,0732	0,587
150	0,296	0,1061	0,844	0,688	0,0878	0,589



## MODE SCWB

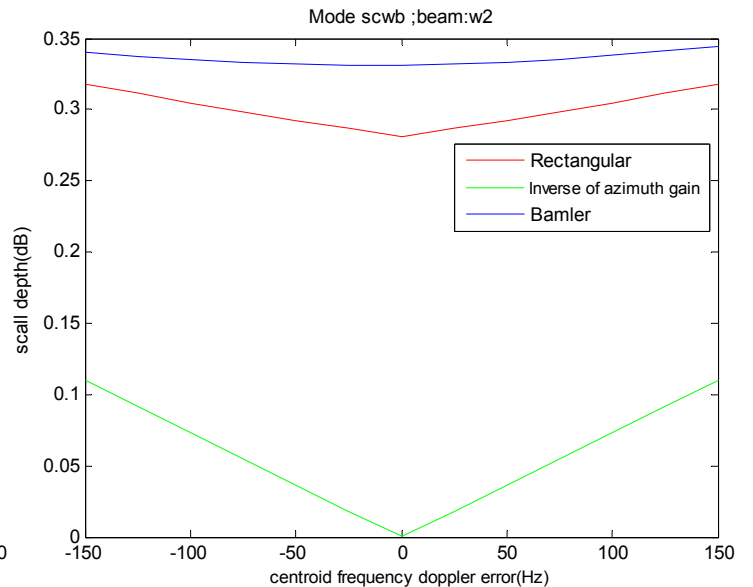
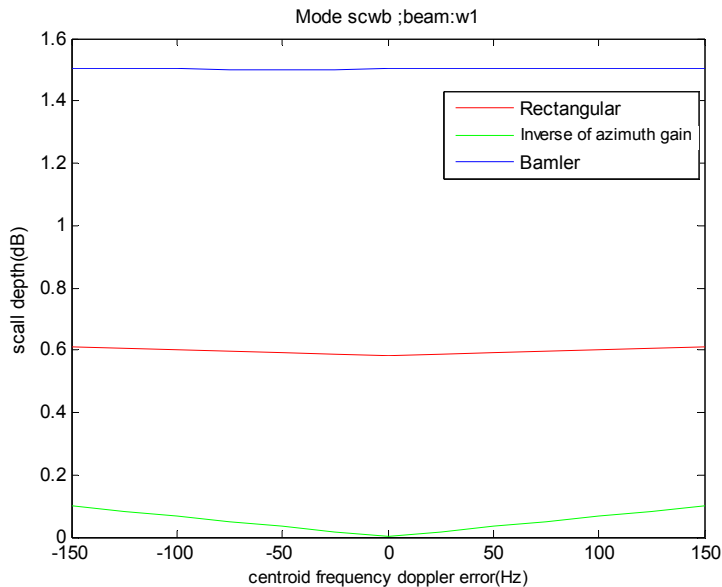
Scalloping Depth without error					
BEAM S5			BEAM S6		
Rectangular Method	Inverse Method	Bamler Method	Rectangular Method	Inverse Method	Bamler Method
0,776	2,41E-15	0,794	0,757	2,41E-15	0,981

Scalloping Depth with error						
Frec Error	BEAM S5			BEAM S6		
	Rectangular Method	Inverse Method	Bamler Method	Rectangular Method	Inverse Method	Bamler Method
-150	0,777	0,0795	0,797	0,763	0,0400	0,986
-125	0,777	0,0662	0,796	0,761	0,0333	0,985
-100	0,776	0,0530	0,795	0,760	0,0266	0,984
-75	0,776	0,0397	0,794	0,759	0,0200	0,983
-50	0,776	0,0265	0,794	0,758	0,0133	0,982
-25	0,776	0,0132	0,794	0,757	0,0066	0,981
0	0,776	2,41E-15	0,794	0,757	2,41E-15	0,981
25	0,776	0,0132	0,794	0,757	0,0066	0,981
50	0,776	0,0265	0,794	0,758	0,0133	0,980
75	0,776	0,0397	0,795	0,759	0,0200	0,980
100	0,776	0,0530	0,796	0,760	0,0266	0,980
125	0,777	0,0662	0,797	0,761	0,0333	0,981
150	0,777	0,0795	0,799	0,763	0,0400	0,982



Scalloping Depth without error					
BEAM W1			BEAM W2		
Rectangular Method	Inverse Method	Bamler Method	Rectangular Method	Inverse Method	Bamler Method
0,582	3,38E-15	1,501	0,280	2,41E-15	0,331

Scalloping Depth with error						
BEAM W1			BEAM W2			
Frec Error	Rectangular Method	Inverse Method	Bamler Method	Rectangular Method	Inverse Method	Bamler Method
-150	0,612	0,0985	1,502	0,317	0,1096	0,340
-125	0,607	0,0821	1,501	0,311	0,0913	0,337
-100	0,602	0,0657	1,501	0,304	0,0730	0,334
-75	0,597	0,0492	1,501	0,298	0,0548	0,333
-50	0,592	0,0328	1,501	0,292	0,0365	0,332
-25	0,587	0,0164	1,501	0,286	0,0182	0,331
0	0,582	3,38E-15	1,501	0,280	2,41E-15	0,331
25	0,587	0,0164	1,501	0,286	0,0182	0,332
50	0,592	0,0328	1,502	0,292	0,0365	0,333
75	0,597	0,0492	1,502	0,298	0,0548	0,335
100	0,602	0,0657	1,502	0,304	0,0730	0,338
125	0,607	0,0821	1,503	0,311	0,0913	0,341
150	0,612	0,0985	1,503	0,317	0,1096	0,344



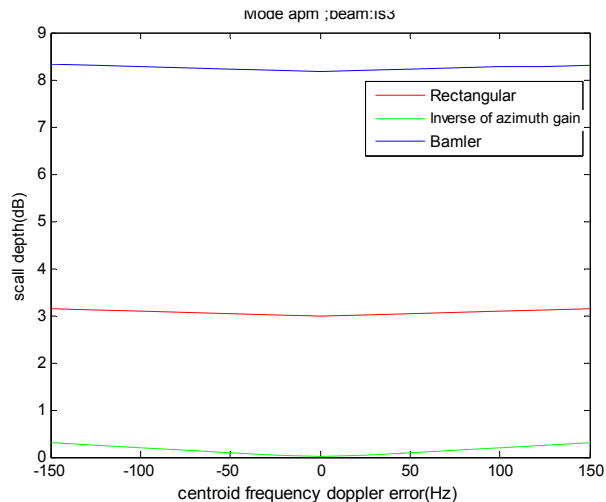
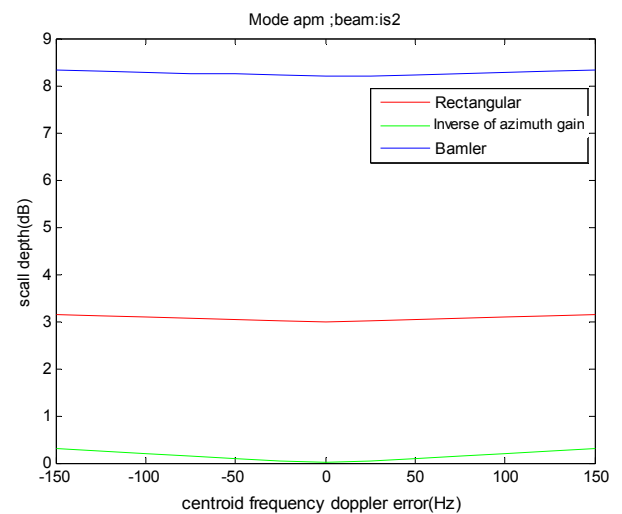
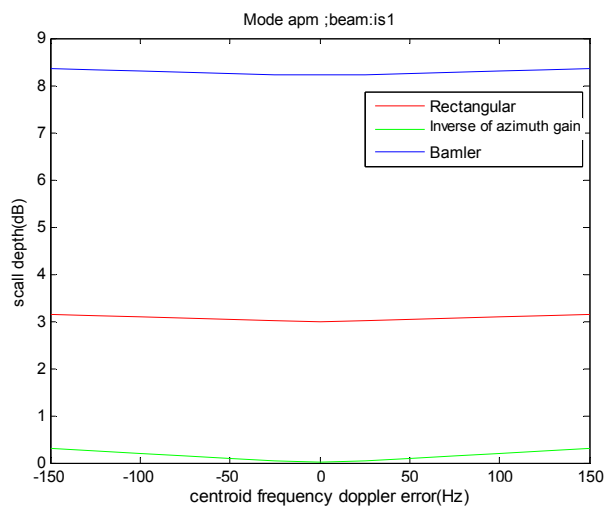


### Anexo 3: Profundidad de scalloping para todos los beams de Envisat en ScanSAR

nota: todos los resultados estan en db

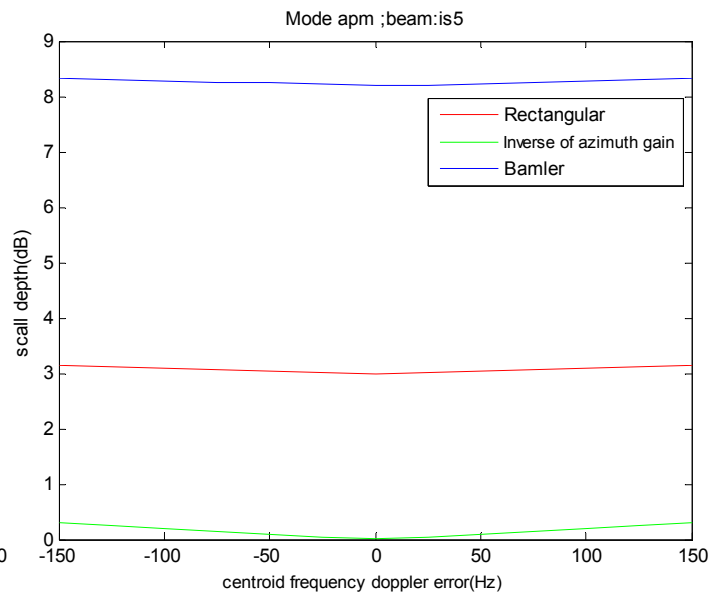
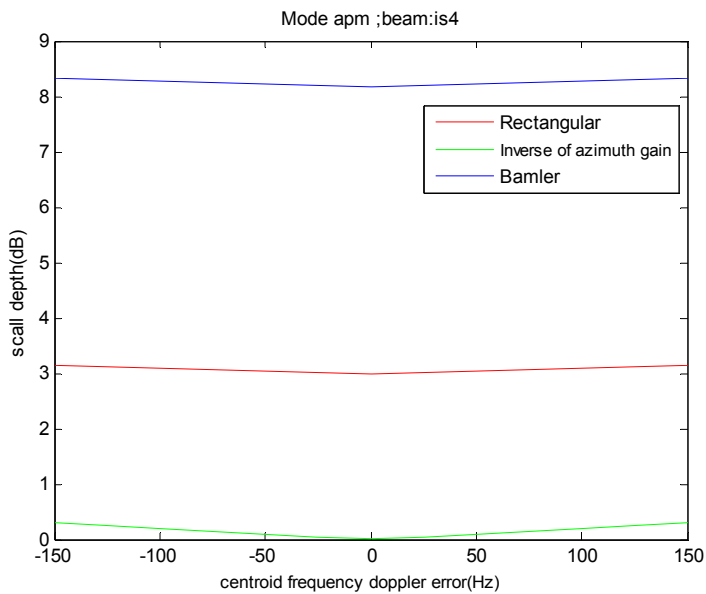
#### MODE APM

	BEAM IS1			BEAM IS2			BEAM IS3		
Frec Error	Rectan Method	Inverse Method	Bamler Method	Rectan Method	Inverse Method	Bamler Method	Rectan Method	Inverse Method	Bamler Method
	Scallop Depth without error			Scallop Depth without error			Scallop Depth without error		
	2,997	2,8E-15	8,211	2,992	3,3E-15	8,188	2,997	4,3E-15	8,176
Frec Error	Scalloping Depth with error			Scalloping Depth with error			Scalloping Depth with error		
-150	3,147	0,295	8,361	3,142	0,294	8,337	3,146	0,295	8,326
-125	3,122	0,245	8,336	3,116	0,245	8,312	3,121	0,245	8,301
-100	3,096	0,196	8,311	3,091	0,196	8,287	3,096	0,196	8,275
-75	3,071	0,147	8,286	3,066	0,147	8,262	3,071	0,147	8,250
-50	3,046	0,098	8,261	3,041	0,098	8,237	3,046	0,098	8,225
-25	3,022	0,049	8,236	3,017	0,049	8,212	3,021	0,049	8,201
0	2,997	2,8E-15	8,211	2,992	3,3E-15	8,188	2,997	4,3E-15	8,176
25	3,022	0,049	8,220	3,017	0,049	8,196	3,021	0,049	8,189
50	3,046	0,098	8,245	3,041	0,098	8,221	3,046	0,098	8,213
75	3,071	0,147	8,270	3,066	0,147	8,246	3,071	0,147	8,238
100	3,096	0,196	8,295	3,091	0,196	8,271	3,096	0,196	8,263
125	3,122	0,245	8,320	3,116	0,245	8,296	3,121	0,245	8,289
150	3,147	0,295	8,345	3,142	0,294	8,322	3,146	0,295	8,314



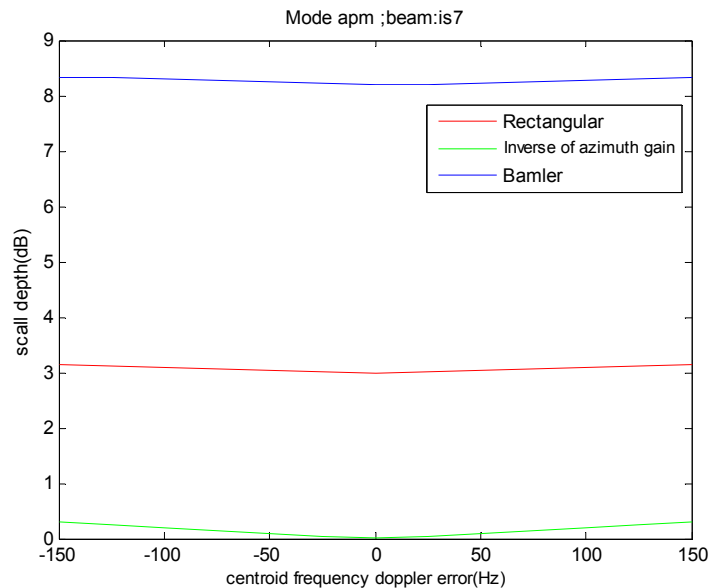
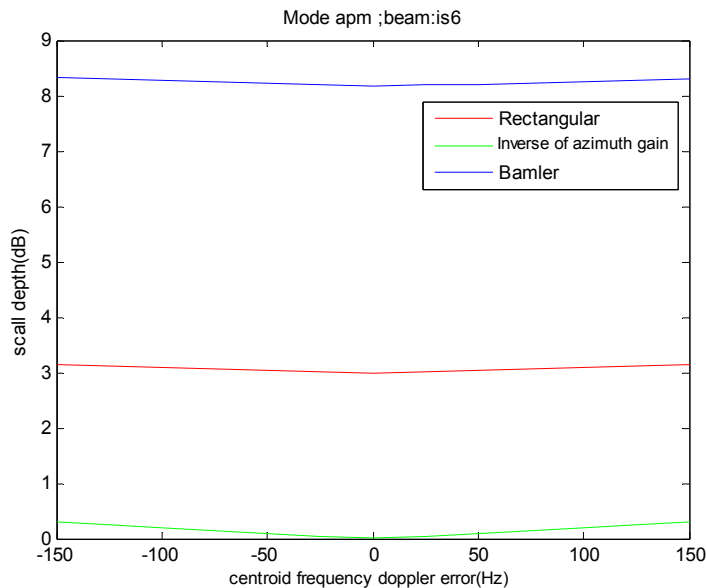
Scalloping Depth without error					
BEAM IS4			BEAM IS5		
Rectangular Method	Inverse Method	Bamler Method	Rectangular Method	Inverse Method	Bamler Method
2,985	1,93E-15	8,182	2,992	2,41E-15	8,188

Scalloping Depth with error						
Frec Error	BEAM IS4			BEAM IS5		
	Rectangular Method	Inverse Method	Bamler Method	Rectangular Method	Inverse Method	Bamler Method
-150	3,135	0,294	8,332	3,142	0,294	8,337
-125	3,109	0,245	8,307	3,117	0,245	8,312
-100	3,084	0,196	8,282	3,091	0,196	8,287
-75	3,059	0,147	8,257	3,066	0,147	8,262
-50	3,034	0,098	8,232	3,042	0,098	8,237
-25	3,010	0,049	8,207	3,017	0,049	8,212
0	2,985	1,93E-15	8,182	2,992	2,41E-15	8,188
25	3,010	0,049	8,192	3,017	0,049	8,201
50	3,034	0,098	8,217	3,042	0,098	8,226
75	3,059	0,147	8,242	3,066	0,147	8,251
100	3,084	0,196	8,267	3,091	0,196	8,276
125	3,109	0,245	8,292	3,117	0,245	8,301
150	3,135	0,294	8,317	3,142	0,294	8,326



Scalloping Depth without error					
BEAM IS6			BEAM IS7		
Rectangular Method	Inverse Method	Bamler Method	Rectangular Method	Inverse Method	Bamler Method
2,994	2,89E-15	8,173	2,997	2,89E-15	8,191

Scalloping Depth with error						
Frec Error	BEAM IS6			BEAM IS7		
	Rectangular Method	Inverse Method	Bamler Method	Rectangular Method	Inverse Method	Bamler Method
-150	3,144	0,295	8,322	3,147	0,295	8,341
-125	3,119	0,245	8,297	3,122	0,245	8,316
-100	3,094	0,196	8,272	3,097	0,196	8,291
-75	3,069	0,147	8,247	3,071	0,147	8,266
-50	3,044	0,098	8,222	3,047	0,098	8,241
-25	3,019	0,049	8,197	3,022	0,049	8,216
0	2,994	2,89E-15	8,173	2,997	2,89E-15	8,191
25	3,019	0,049	8,184	3,022	0,049	8,206
50	3,044	0,098	8,209	3,047	0,098	8,230
75	3,069	0,147	8,234	3,071	0,147	8,255
100	3,094	0,196	8,259	3,097	0,196	8,280
125	3,119	0,245	8,284	3,122	0,245	8,306
150	3,144	0,295	8,309	3,147	0,295	8,331



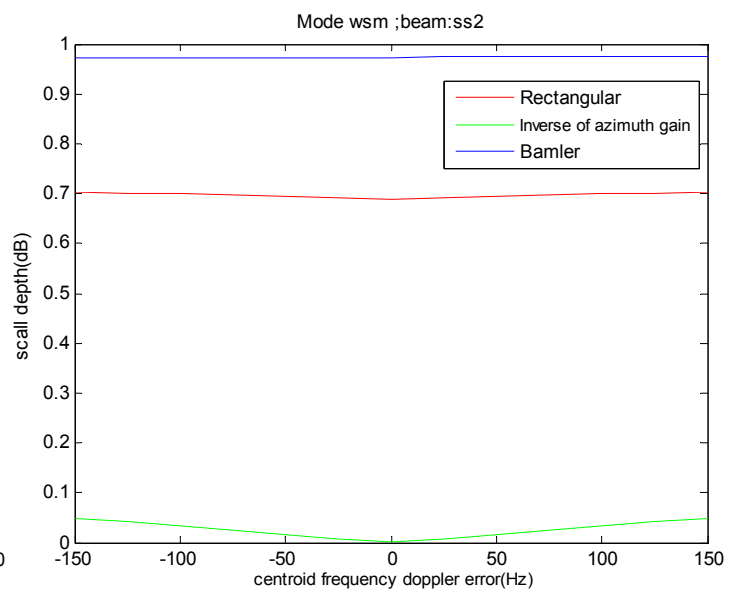
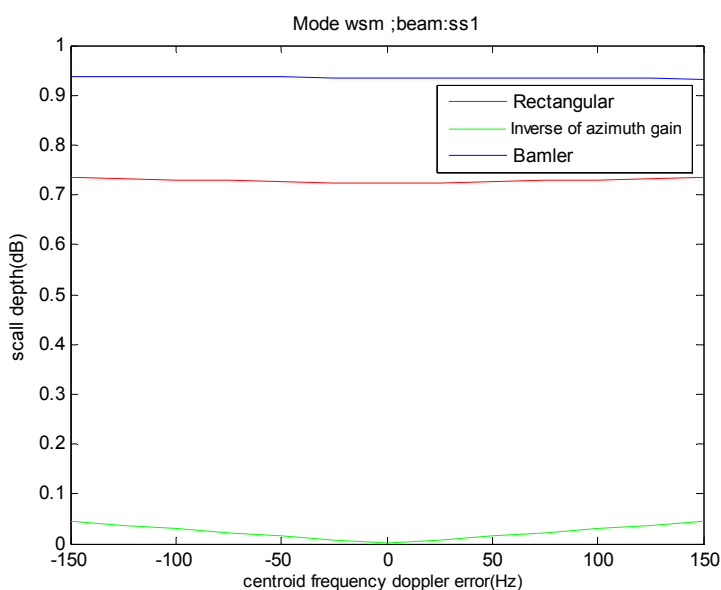
### MODE GMM

NO ESTUDIADO POR DIVERGENCIAS EN LOS DATOS

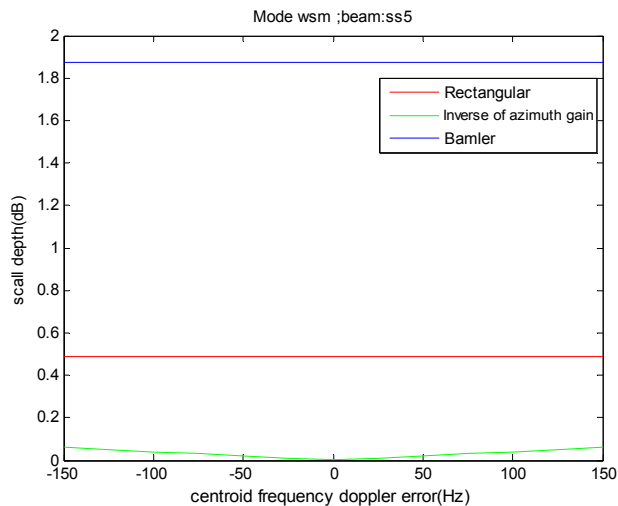
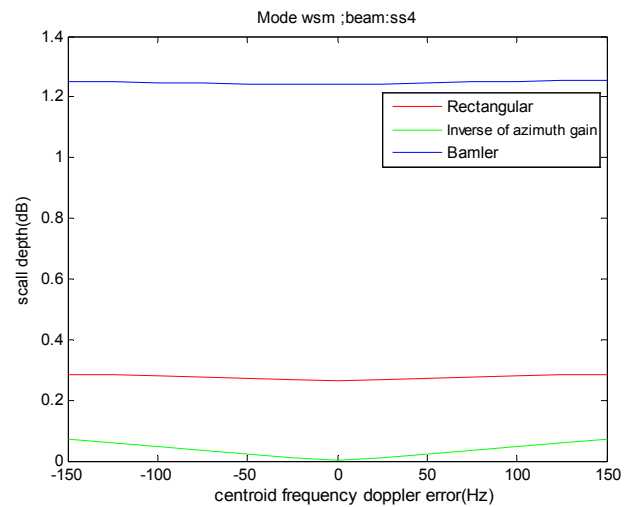
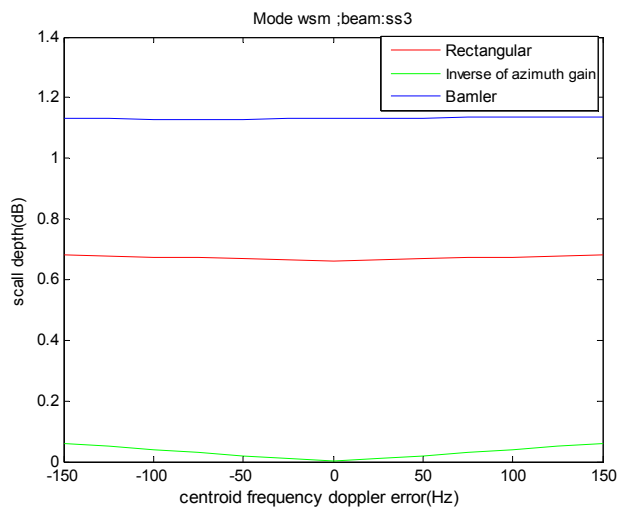
### MODE WSM

Scalloping Depth without error					
BEAM SS1			BEAM SS2		
Rectangular Method	Inverse Method	Bamler Method	Rectangular Method	Inverse Method	Bamler Method
0,722	1,93E-15	0,934	0,689	1,93E-15	0,973

Scalloping Depth with error						
	BEAM SS1			BEAM SS2		
Frec Error	Rectangular Method	Inverse Method	Bamler Method	Rectangular Method	Inverse Method	Bamler Method
-150	0,735	0,0452	0,938	0,703	0,0491	0,972
-125	0,733	0,0376	0,937	0,701	0,0409	0,972
-100	0,730	0,0301	0,936	0,698	0,0327	0,973
-75	0,728	0,0226	0,936	0,696	0,0245	0,973
-50	0,726	0,0150	0,935	0,694	0,0163	0,973
-25	0,724	0,0075	0,935	0,691	0,0081	0,973
0	0,722	1,93E-15	0,934	0,689	1,93E-15	0,973
25	0,724	0,0075	0,934	0,691	0,0081	0,973
50	0,726	0,0150	0,934	0,694	0,0163	0,973
75	0,728	0,0226	0,933	0,696	0,0245	0,974
100	0,730	0,0301	0,933	0,698	0,0327	0,974
125	0,733	0,0376	0,932	0,701	0,0409	0,974
150	0,735	0,0452	0,932	0,703	0,0491	0,974

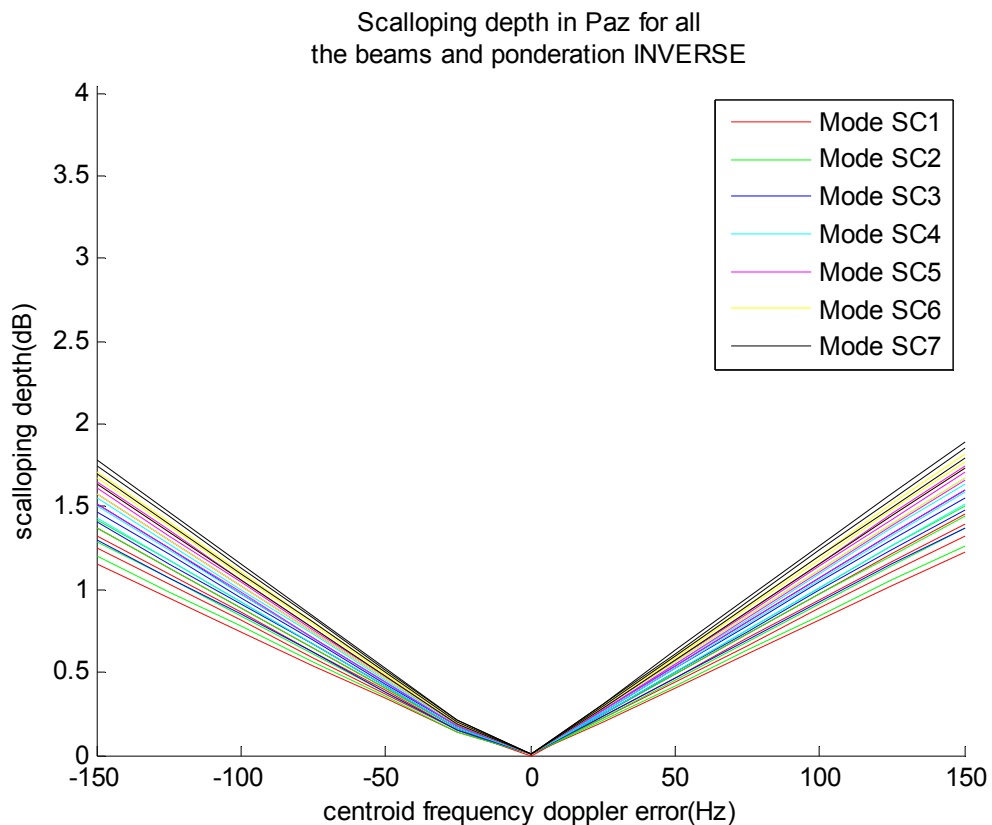
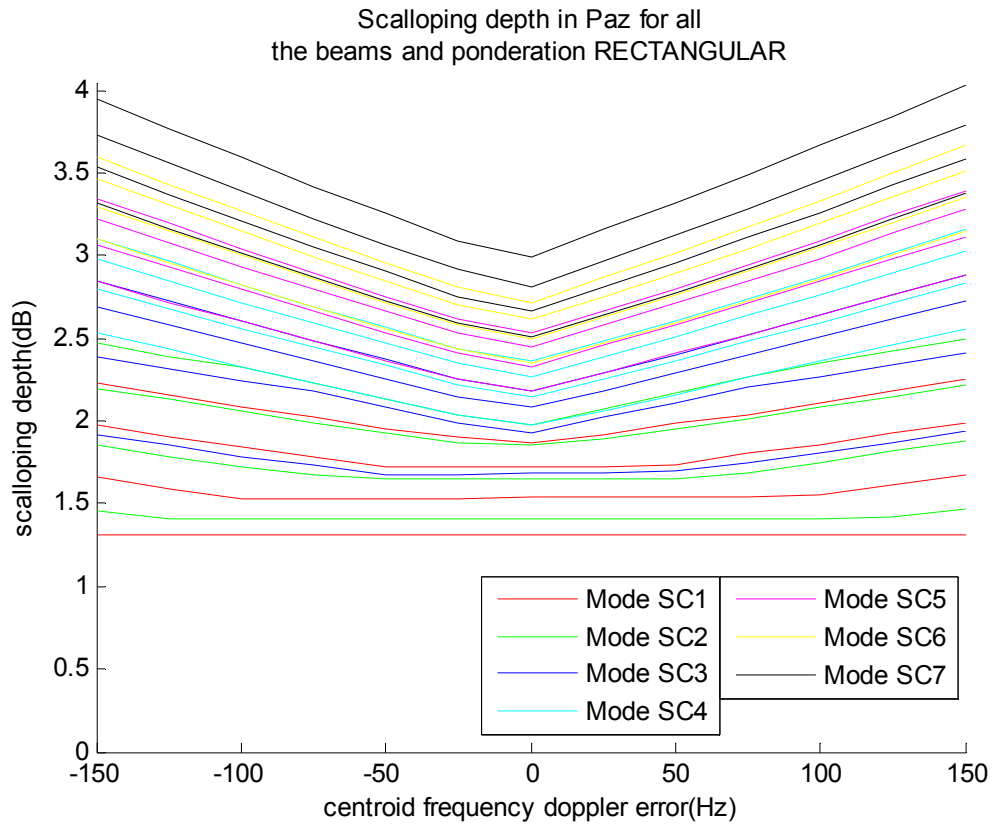


	BEAM SS3			BEAM SS4			BEAM SS5		
Frec Error	Rectan Method	Inverse Method	Bamler Method	Rectan Method	Inverse Method	Bamler Method	Rectan Method	Inverse Method	Bamler Method
	Scalloping Depth without error			Scalloping Depth without error			Scalloping Depth without error		
	0,662	1,9E-15	1,131	0,263	2,8E-15	1,242	0,485	1,4E-15	1,872
Frec Error	Scalloping Depth with error			Scalloping Depth with error			Scalloping Depth with error		
-150	0,681	0,0596	1,131	0,286	0,0705	1,251	0,486	0,0595	1,872
-125	0,677	0,0497	1,130	0,282	0,0587	1,249	0,486	0,0496	1,872
-100	0,674	0,0397	1,129	0,278	0,0470	1,247	0,486	0,0397	1,872
-75	0,671	0,0298	1,128	0,274	0,0352	1,244	0,485	0,0297	1,872
-50	0,668	0,0198	1,129	0,271	0,0235	1,242	0,485	0,0198	1,872
-25	0,665	0,0099	1,130	0,267	0,0117	1,240	0,485	0,0099	1,872
0	0,662	1,9E-15	1,131	0,263	2,8E-15	1,242	0,485	1,4E-15	1,872
25	0,665	0,0099	1,132	0,267	0,0117	1,244	0,485	0,0099	1,872
50	0,668	0,0198	1,133	0,271	0,0235	1,246	0,485	0,0198	1,872
75	0,671	0,0298	1,134	0,274	0,0352	1,248	0,485	0,0297	1,872
100	0,674	0,0397	1,135	0,278	0,0470	1,250	0,486	0,0397	1,872
125	0,677	0,0497	1,136	0,282	0,0587	1,253	0,486	0,0496	1,872
150	0,681	0,0596	1,137	0,286	0,0705	1,255	0,486	0,0595	1,872



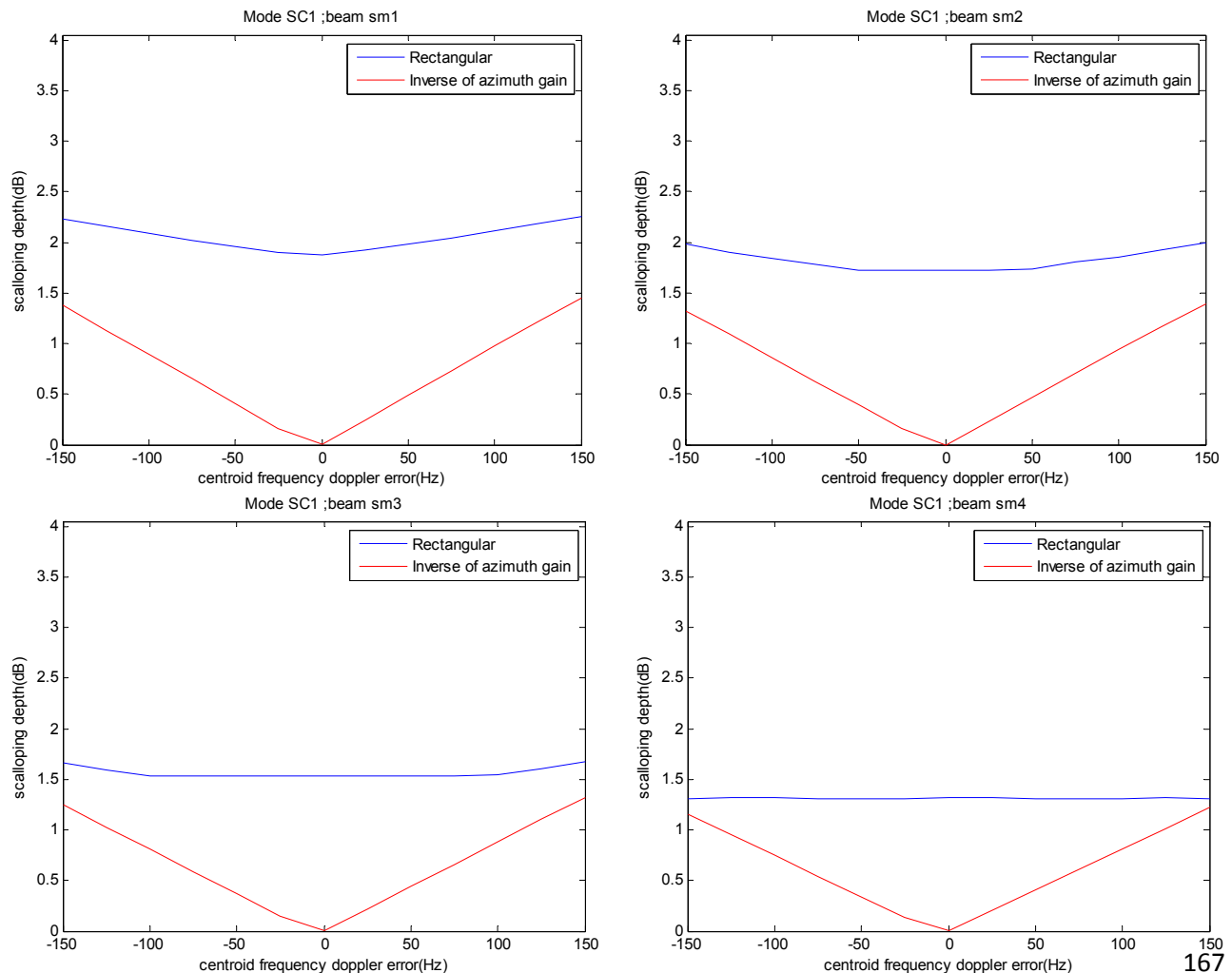
## Anexo 4: Profundidad de scalloping para todos los beams de Paz en ScanSAR

nota: todos los resultados estan en db



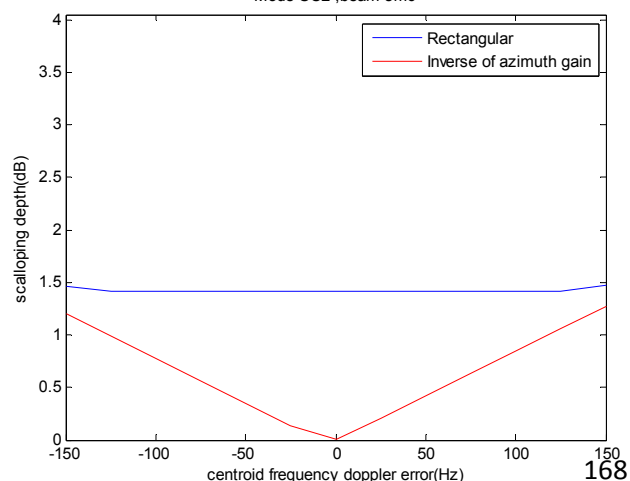
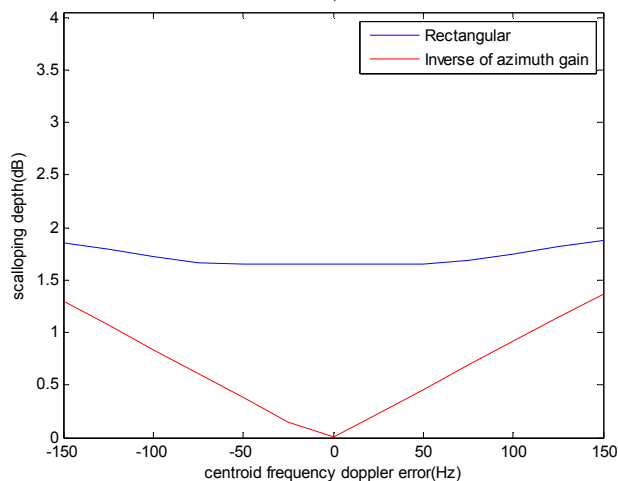
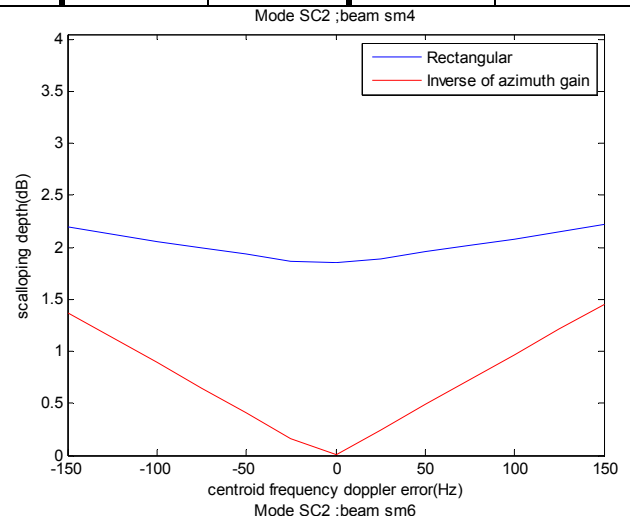
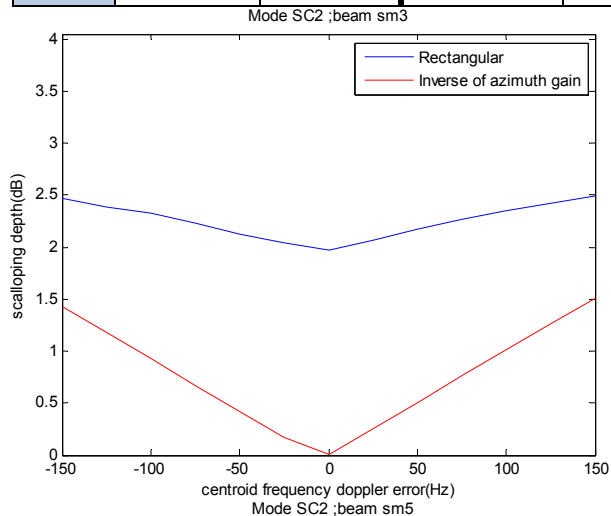
### MODO SC1

Scalloping Depth without error								
	BEAM SM1		BEAM SM2		BEAM SM3		BEAM SM4	
	Rectang Method	Inverse Method	Rectang Method	Inverse Method	Rectang Method	Inverse Method	Rectang Method	Inverse Method
	1,871	9,6E-16	1,722	0	1,535	9,6E-16	1,315	1,9E-15
Scalloping Depth with error								
Frec Error	Rectang Method	Inverse Method	Rectang Method	Inverse Method	Rectang Method	Inverse Method	Rectang Method	Inverse Method
-150	2,228	1,374	1,978	1,320	1,658	1,247	1,313	1,154
-125	2,158	1,135	1,903	1,089	1,591	1,029	1,315	0,950
-100	2,090	0,894	1,845	0,858	1,534	0,810	1,314	0,746
-75	2,024	0,651	1,781	0,625	1,533	0,589	1,313	0,542
-50	1,958	0,408	1,724	0,391	1,534	0,368	1,313	0,339
-25	1,902	0,163	1,724	0,156	1,535	0,147	1,314	0,135
0	1,871	9,6E-16	1,722	0	1,535	9,6E-16	1,315	1,9E-15
25	1,919	0,245	1,721	0,235	1,536	0,220	1,314	0,203
50	1,984	0,489	1,737	0,469	1,536	0,441	1,313	0,406
75	2,041	0,732	1,801	0,703	1,536	0,662	1,313	0,610
100	2,108	0,974	1,858	0,935	1,549	0,883	1,314	0,814
125	2,186	1,215	1,924	1,166	1,608	1,102	1,315	1,018
150	2,255	1,453	1,991	1,396	1,676	1,320	1,314	1,222



**MODO SC2** (NOTA: los beams SM3 y SM4 del modo SC1 y SC2 dan resultados diferentes debido al diferente tiempo de ciclo entre ambos modos de exploración)

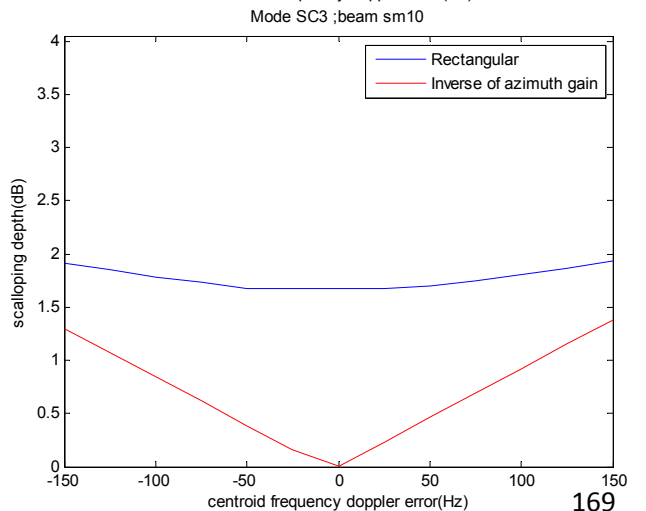
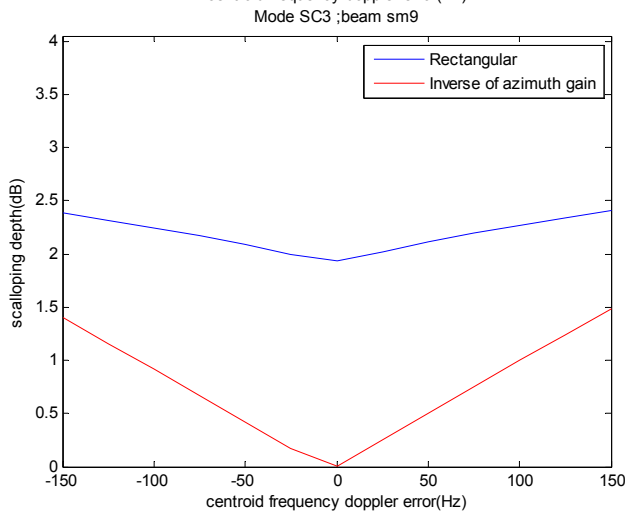
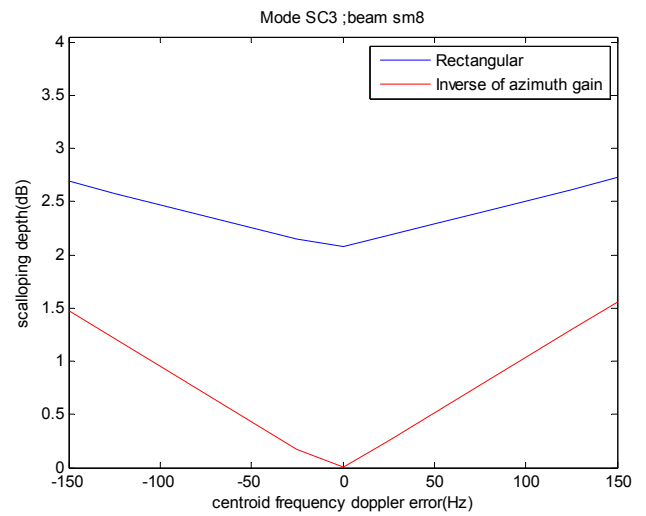
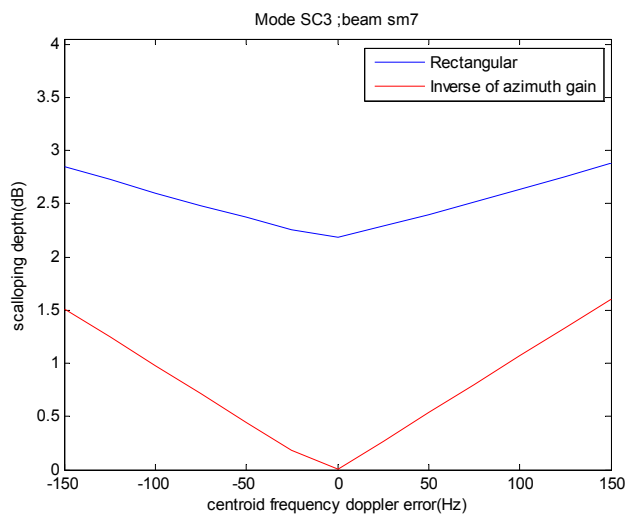
Scalloping Depth without error								
	BEAM SM3		BEAM SM4		BEAM SM5		BEAM SM4	
	Rectang Method	Inverse Method	Rectang Method	Inverse Method	Rectang Method	Inverse Method	Rectang Method	Inverse Method
	1,975	1,9E-15	1,851	1,9E-15	1,648	9,6E-16	1,414	9,6E-16
Scalloping Depth with error								
Frec Error	Rectang Method	Inverse Method	Rectang Method	Inverse Method	Rectang Method	Inverse Method	Rectang Method	Inverse Method
-150	2,468	1,422	2,194	1,366	1,857	1,292	1,458	1,198
-125	2,391	1,175	2,128	1,128	1,788	1,066	1,412	0,987
-100	2,325	0,926	2,056	0,889	1,728	0,840	1,413	0,775
-75	2,232	0,674	1,993	0,648	1,668	0,612	1,413	0,564
-50	2,130	0,421	1,931	0,406	1,651	0,382	1,413	0,352
-25	2,037	0,168	1,871	0,162	1,648	0,153	1,413	0,140
0	1,975	1,9E-15	1,851	1,9E-15	1,648	9,6E-16	1,414	9,6E-16
25	2,067	0,253	1,893	0,244	1,651	0,229	1,412	0,211
50	2,168	0,505	1,955	0,487	1,648	0,459	1,414	0,422
75	2,262	0,758	2,017	0,728	1,685	0,688	1,412	0,634
100	2,352	1,009	2,080	0,969	1,745	0,915	1,413	0,846
125	2,418	1,257	2,145	1,207	1,813	1,142	1,416	1,058
150	2,496	1,505	2,219	1,445	1,875	1,366	1,474	1,267





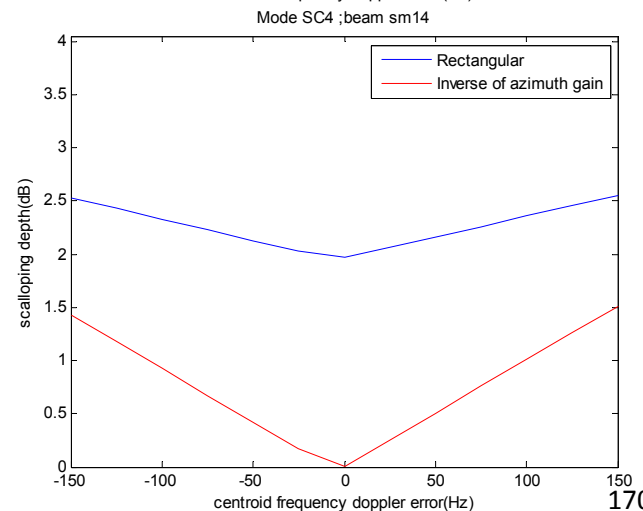
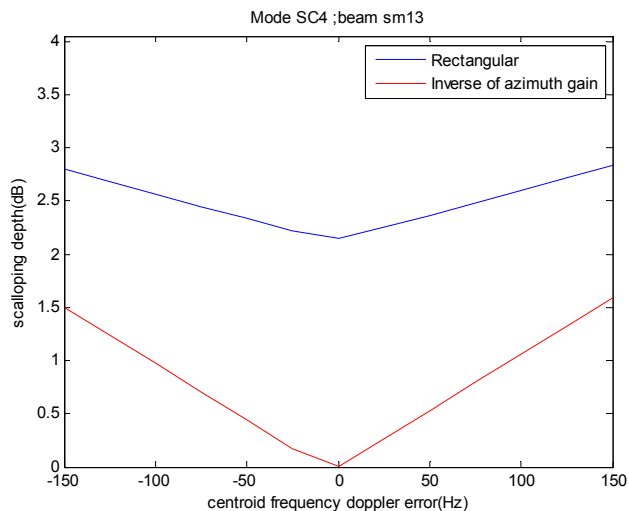
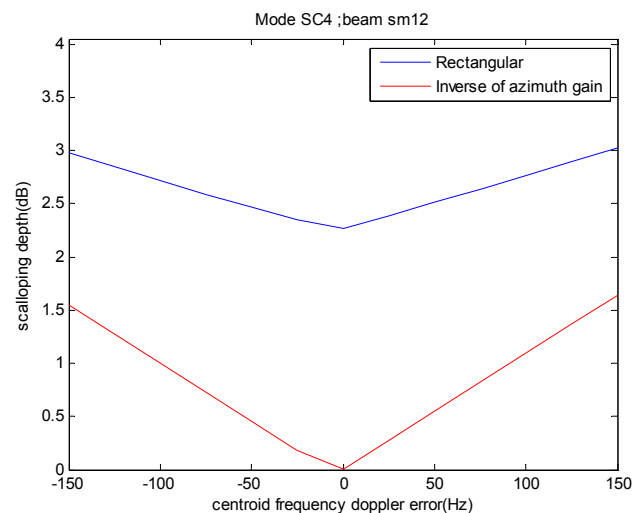
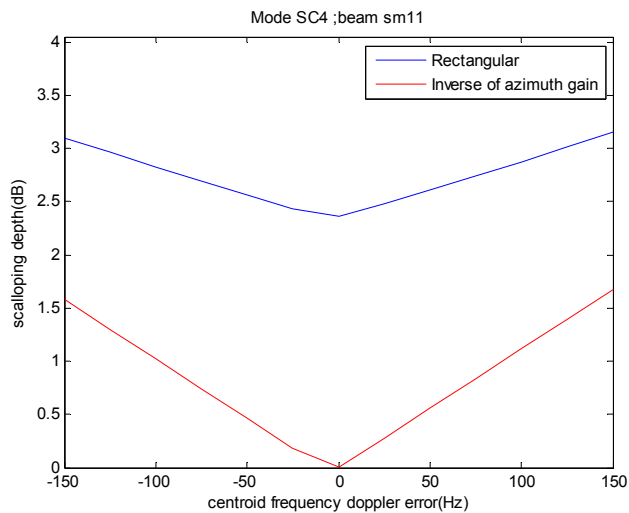
### MODO SC3

	Scalloping Depth without error							
	BEAM SM7		BEAM SM8		BEAM SM9		BEAM SM10	
	Rectang Method	Inverse Method	Rectang Method	Inverse Method	Rectang Method	Inverse Method	Rectang Method	Inverse Method
	2,184	2,8E-15	2,080	1,4E-15	1,930	9,6E-16	1,681	9,6E-16
	Scalloping Depth with error							
Frec Error	Rectang Method	Inverse Method	Rectang Method	Inverse Method	Rectang Method	Inverse Method	Rectang Method	Inverse Method
-150	2,846	1,512	2,691	1,472	2,390	1,403	1,914	1,302
-125	2,723	1,245	2,578	1,213	2,320	1,159	1,854	1,075
-100	2,603	0,979	2,467	0,954	2,244	0,913	1,787	0,846
-75	2,485	0,712	2,358	0,694	2,177	0,666	1,729	0,617
-50	2,370	0,445	2,251	0,434	2,085	0,416	1,679	0,386
-25	2,256	0,178	2,150	0,173	1,994	0,166	1,679	0,154
0	2,184	2,8E-15	2,080	1,4E-15	1,930	9,6E-16	1,681	9,6E-16
25	2,288	0,267	2,185	0,260	2,021	0,250	1,680	0,231
50	2,402	0,534	2,291	0,520	2,112	0,499	1,694	0,463
75	2,519	0,801	2,400	0,781	2,201	0,748	1,752	0,694
100	2,637	1,068	2,503	1,040	2,268	0,995	1,811	0,923
125	2,758	1,334	2,615	1,300	2,337	1,240	1,870	1,151
150	2,882	1,601	2,728	1,559	2,415	1,484	1,939	1,377



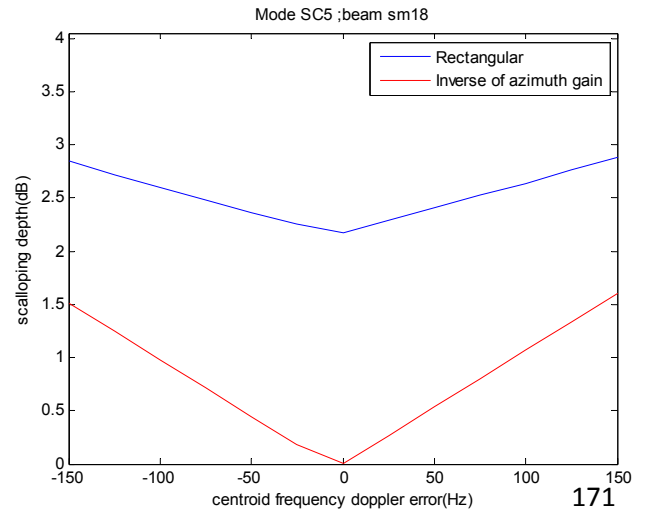
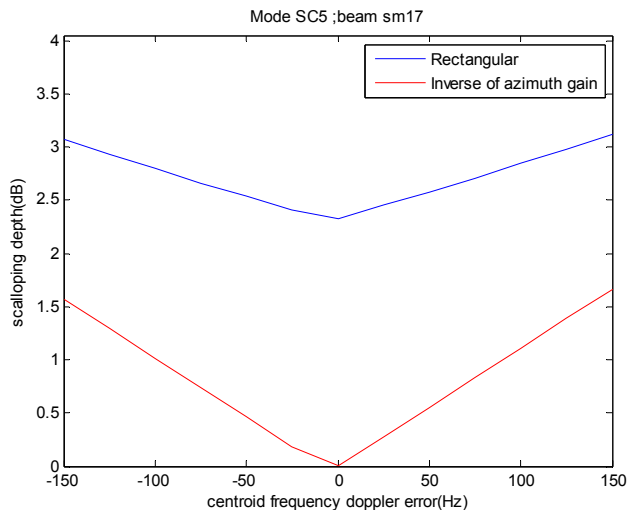
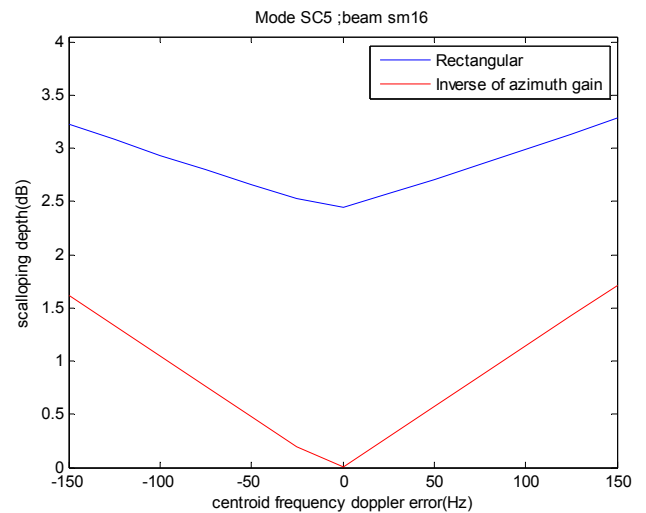
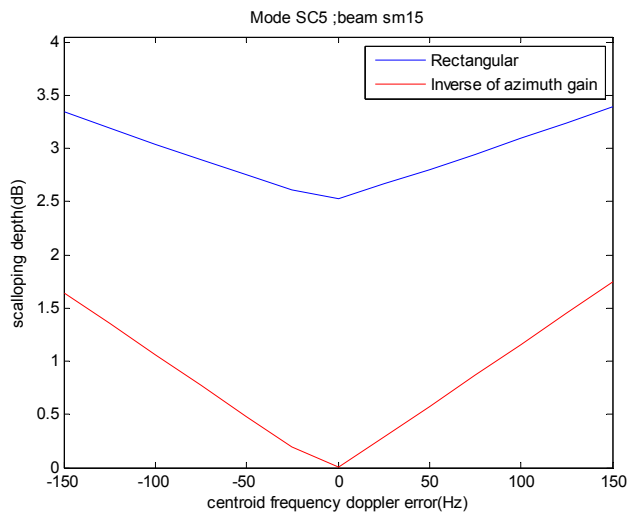
### MODO SC4

Scalloping Depth without error								
	BEAM SM11		BEAM SM12		BEAM SM13		BEAM SM14	
	Rectang Method	Inverse Method	Rectang Method	Inverse Method	Rectang Method	Inverse Method	Rectang Method	Inverse Method
	2,360	1,9E-15	2,271	1,4E-15	2,147	1,4E-15	1,971	1,4E-15
Scalloping Depth with error								
Frec Error	Rectang Method	Inverse Method	Rectang Method	Inverse Method	Rectang Method	Inverse Method	Rectang Method	Inverse Method
-150	3,100	1,581	2,979	1,548	2,796	1,500	2,531	1,429
-125	2,962	1,302	2,848	1,275	2,680	1,236	2,430	1,178
-100	2,827	1,022	2,719	1,002	2,561	0,971	2,331	0,926
-75	2,695	0,743	2,592	0,729	2,444	0,706	2,227	0,674
-50	2,566	0,464	2,469	0,455	2,334	0,441	2,130	0,421
-25	2,436	0,185	2,348	0,182	2,222	0,176	2,034	0,168
0	2,360	1,9E-15	2,271	1,4E-15	2,147	1,4E-15	1,971	1,4E-15
25	2,484	0,278	2,390	0,273	2,252	0,265	2,061	0,252
50	2,611	0,557	2,511	0,546	2,366	0,530	2,163	0,505
75	2,741	0,836	2,636	0,820	2,481	0,795	2,261	0,758
100	2,874	1,115	2,763	1,093	2,594	1,060	2,359	1,010
125	3,015	1,395	2,894	1,366	2,714	1,324	2,459	1,261
150	3,155	1,674	3,027	1,640	2,836	1,588	2,557	1,512



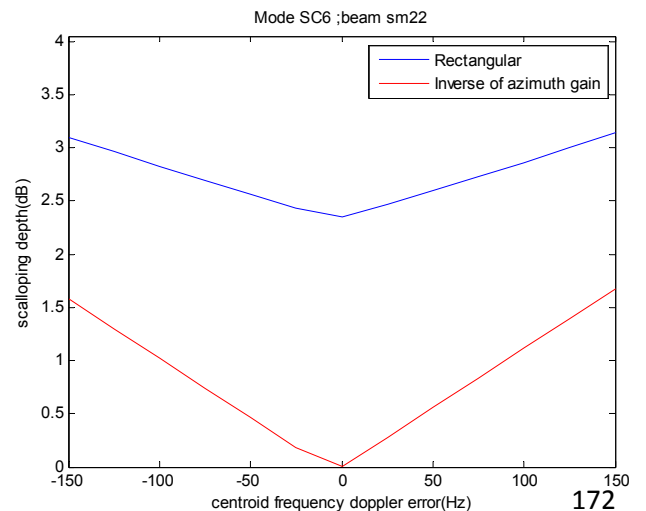
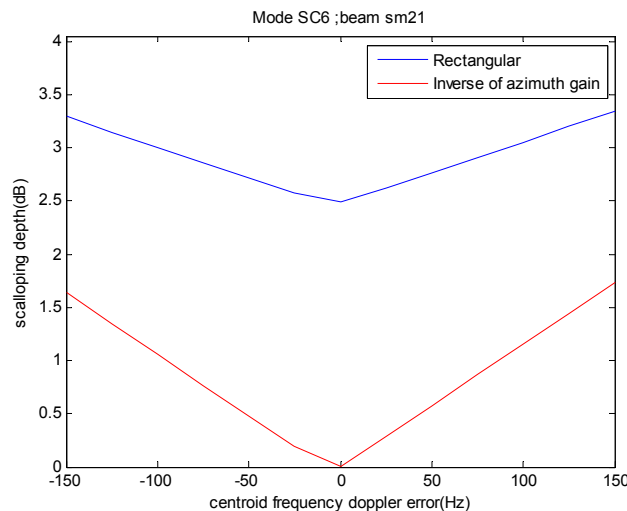
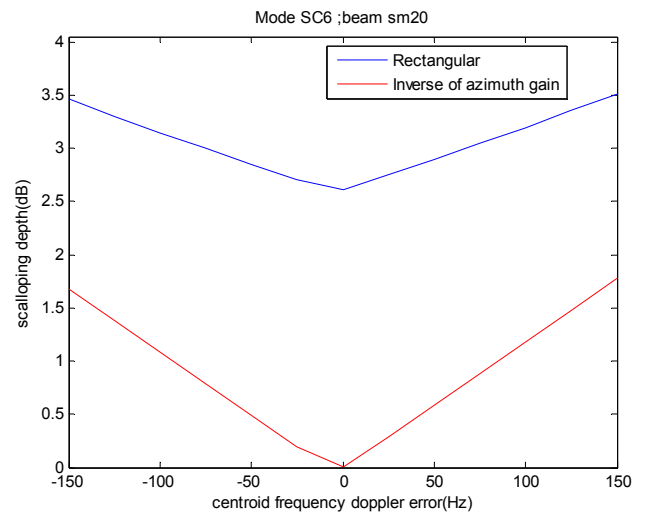
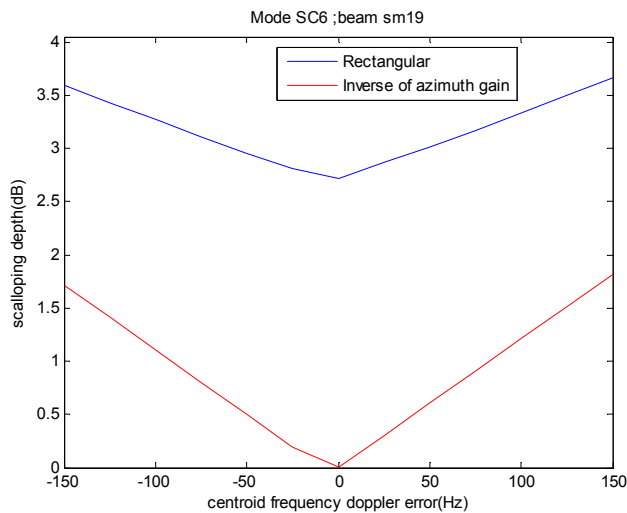
### MODO SC5

Scalloping Depth without error								
	BEAM SM15		BEAM SM16		BEAM SM17		BEAM SM18	
	Rectang Method	Inverse Method	Rectang Method	Inverse Method	Rectang Method	Inverse Method	Rectang Method	Inverse Method
	2,527	2,8E-15	2,443	2,8E-15	2,332	2,4E-15	2,177	3,3E-15
Scalloping Depth with error								
Frec Error	Rectang Method	Inverse Method	Rectang Method	Inverse Method	Rectang Method	Inverse Method	Rectang Method	Inverse Method
-150	3,342	1,645	3,226	1,614	3,067	1,572	2,846	1,513
-125	3,192	1,354	3,081	1,329	2,928	1,295	2,719	1,246
-100	3,041	1,063	2,933	1,044	2,797	1,017	2,600	0,980
-75	2,893	0,773	2,795	0,759	2,664	0,740	2,483	0,712
-50	2,754	0,483	2,660	0,474	2,534	0,462	2,363	0,445
-25	2,614	0,193	2,529	0,189	2,412	0,184	2,250	0,178
0	2,527	2,8E-15	2,443	2,8E-15	2,332	2,4E-15	2,177	3,3E-15
25	2,665	0,289	2,576	0,284	2,456	0,277	2,288	0,267
50	2,801	0,579	2,709	0,569	2,579	0,555	2,406	0,534
75	2,947	0,870	2,845	0,854	2,711	0,832	2,522	0,802
100	3,091	1,160	2,984	1,139	2,845	1,110	2,640	1,069
125	3,244	1,451	3,133	1,424	2,977	1,388	2,766	1,336
150	3,395	1,742	3,280	1,710	3,118	1,666	2,889	1,603



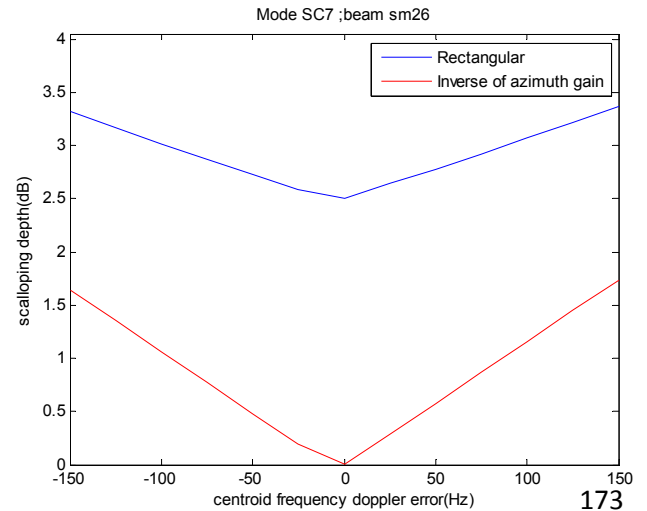
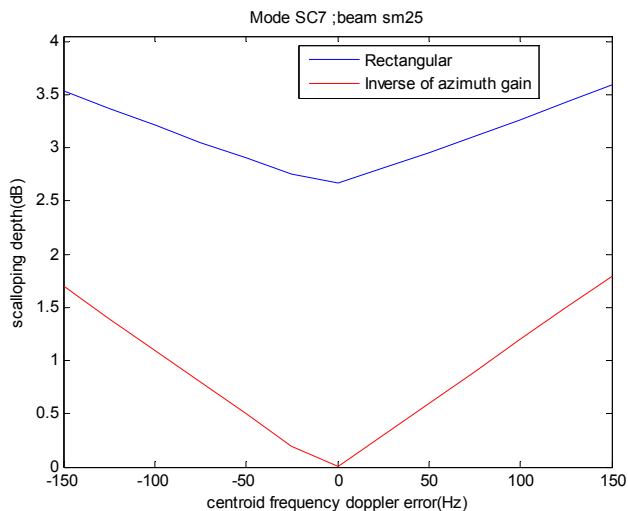
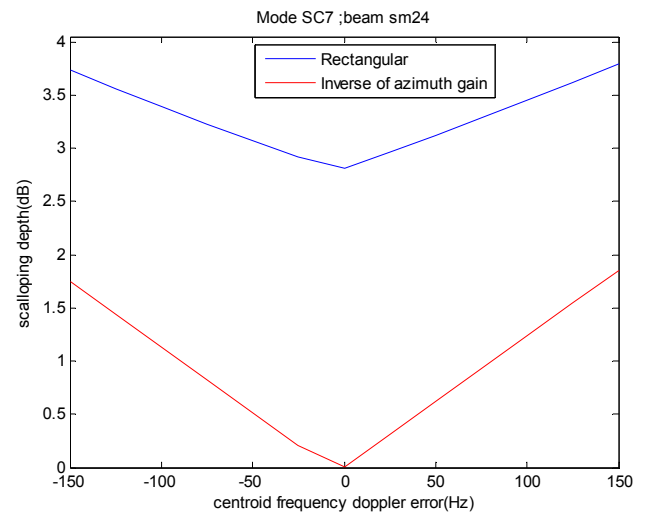
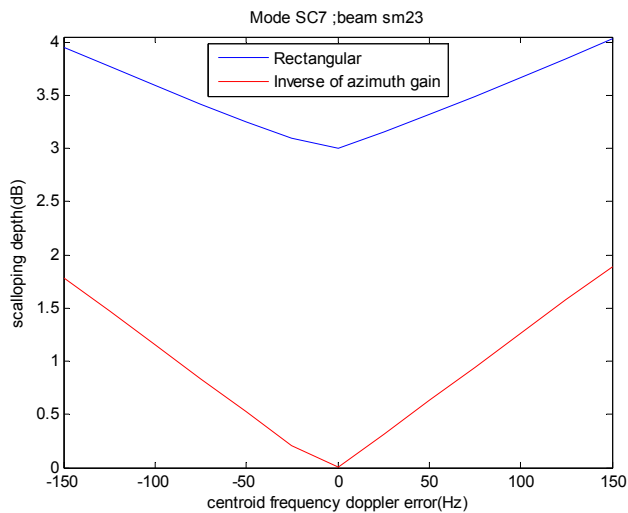
**MODO SC6**

Scalloping Depth without error								
	BEAM SM19		BEAM SM20		BEAM SM21		BEAM SM22	
	Rectang Method	Inverse Method	Rectang Method	Inverse Method	Rectang Method	Inverse Method	Rectang Method	Inverse Method
	2,718	1,9E-15	2,613	1,9E-15	2,493	2,8E-15	2,349	2,4E-15
Scalloping Depth with error								
Frec Error	Rectang Method	Inverse Method	Rectang Method	Inverse Method	Rectang Method	Inverse Method	Rectang Method	Inverse Method
-150	3,596	1,713	3,458	1,677	3,295	1,634	3,099	1,581
-125	3,429	1,410	3,300	1,380	3,146	1,345	2,961	1,302
-100	3,272	1,107	3,146	1,084	3,000	1,057	2,822	1,023
-75	3,113	0,805	2,996	0,788	2,854	0,768	2,690	0,744
-50	2,958	0,503	2,845	0,492	2,716	0,480	2,562	0,465
-25	2,808	0,201	2,703	0,197	2,581	0,192	2,433	0,185
0	2,718	1,9E-15	2,613	1,9E-15	2,493	2,8E-15	2,349	2,4E-15
25	2,866	0,301	2,752	0,295	2,628	0,288	2,472	0,278
50	3,018	0,604	2,896	0,591	2,764	0,576	2,598	0,557
75	3,168	0,906	3,043	0,887	2,903	0,864	2,732	0,837
100	3,329	1,208	3,195	1,183	3,051	1,153	2,864	1,116
125	3,493	1,511	3,356	1,479	3,198	1,442	3,005	1,395
150	3,663	1,815	3,516	1,776	3,349	1,731	3,143	1,674



**MODO SC7**

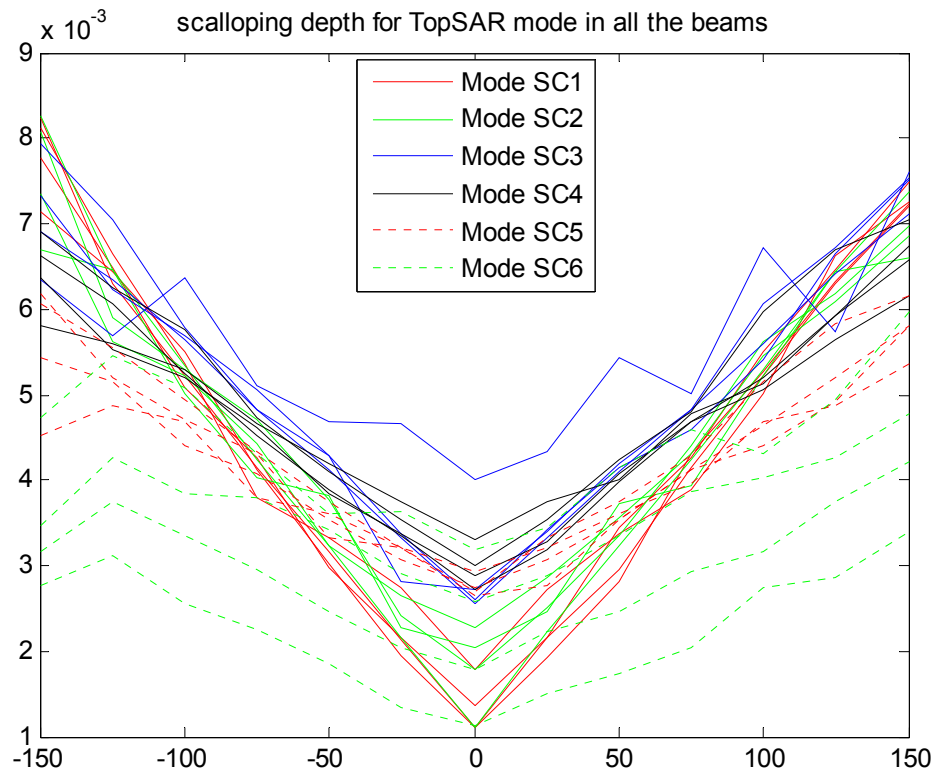
Scalloping Depth without error								
	BEAM SM23		BEAM SM24		BEAM SM25		BEAM SM26	
	Rectang Method	Inverse Method	Rectang Method	Inverse Method	Rectang Method	Inverse Method	Rectang Method	Inverse Method
	2,996	3,3E-15	2,813	2,8E-15	2,664	2,4E-15	2,505	3,3E-15
Scalloping Depth with error								
Frec Error	Rectang Method	Inverse Method	Rectang Method	Inverse Method	Rectang Method	Inverse Method	Rectang Method	Inverse Method
-150	3,951	1,786	3,731	1,749	3,533	1,697	3,318	1,640
-125	3,769	1,469	3,560	1,440	3,367	1,397	3,163	1,350
-100	3,592	1,153	3,393	1,131	3,210	1,097	3,012	1,061
-75	3,420	0,838	3,224	0,822	3,052	0,797	2,870	0,771
-50	3,253	0,524	3,067	0,514	2,904	0,498	2,727	0,482
-25	3,091	0,209	2,913	0,205	2,755	0,199	2,593	0,192
0	2,996	3,3E-15	2,813	2,8E-15	2,664	2,4E-15	2,505	3,3E-15
25	3,156	0,314	2,964	0,308	2,808	0,299	2,641	0,289
50	3,321	0,630	3,124	0,616	2,954	0,598	2,777	0,578
75	3,489	0,943	3,284	0,925	3,109	0,897	2,921	0,867
100	3,664	1,259	3,448	1,233	3,263	1,197	3,070	1,157
125	3,842	1,575	3,622	1,542	3,427	1,497	3,217	1,447
150	4,027	1,892	3,795	1,852	3,589	1,798	3,373	1,737



**Anexo 5: Profundidad de scalloping para todos los beams de Paz en TopSAR**

nota: todos los resultados están en dB

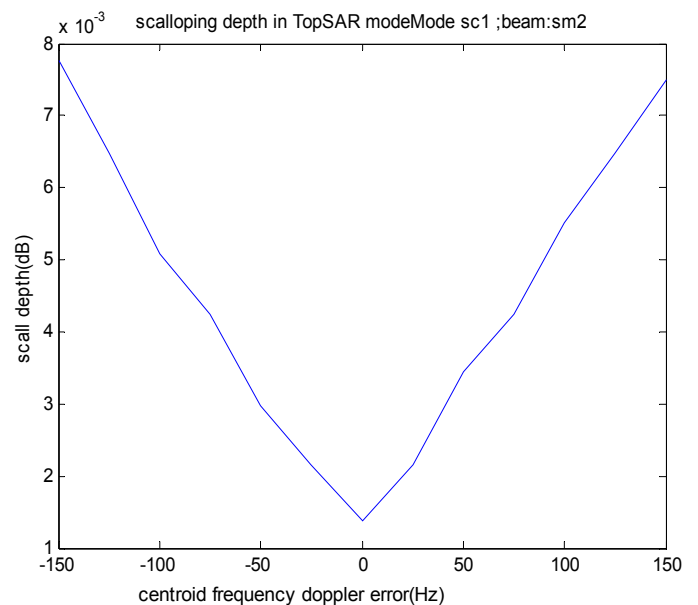
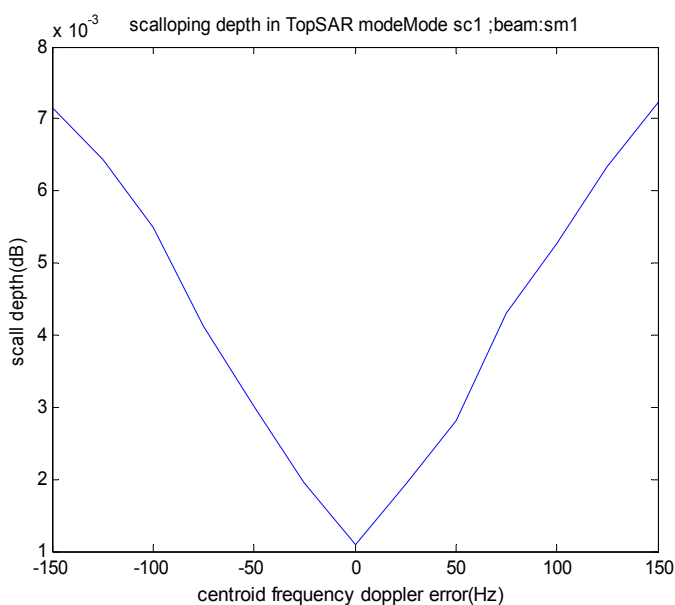
error de ganancia de 1 elemento del array variable, con ponderacion y ancho de haz real



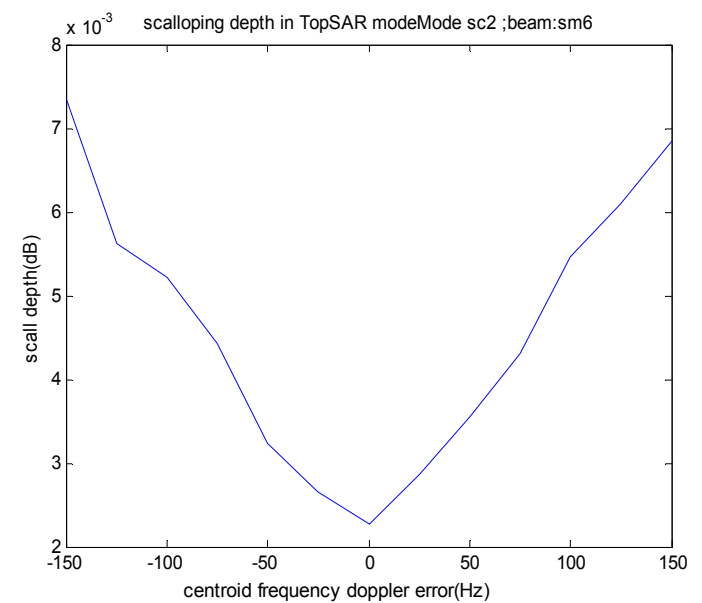
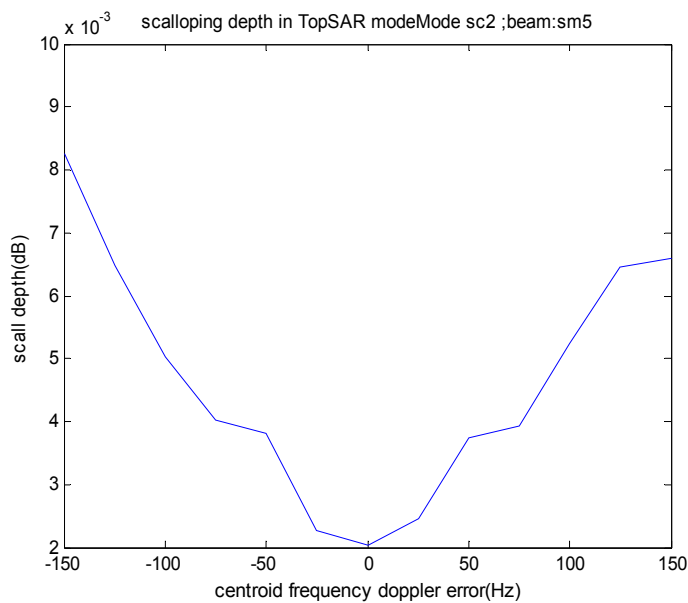
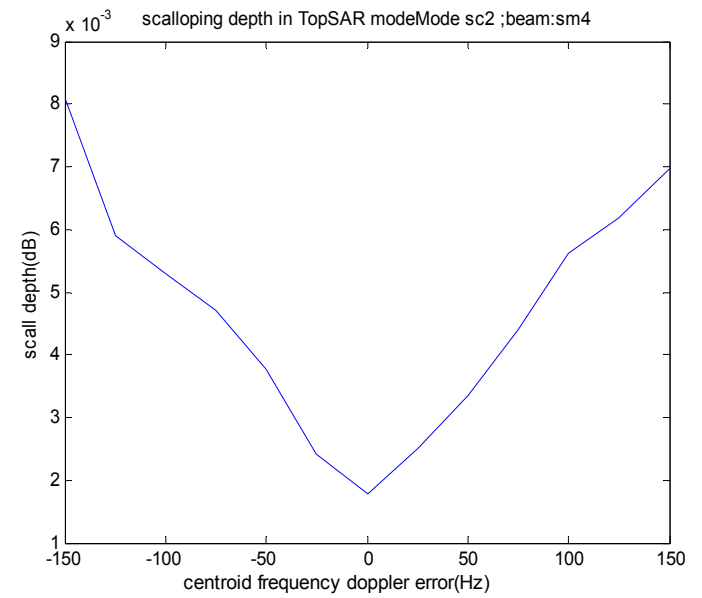
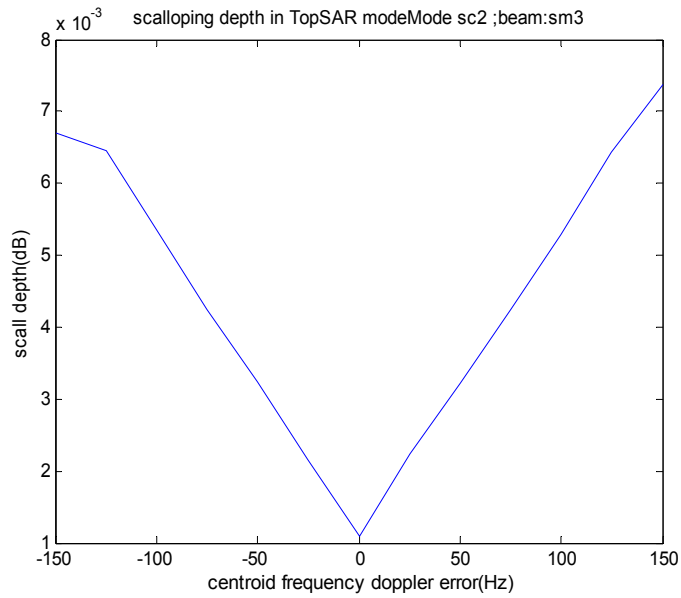
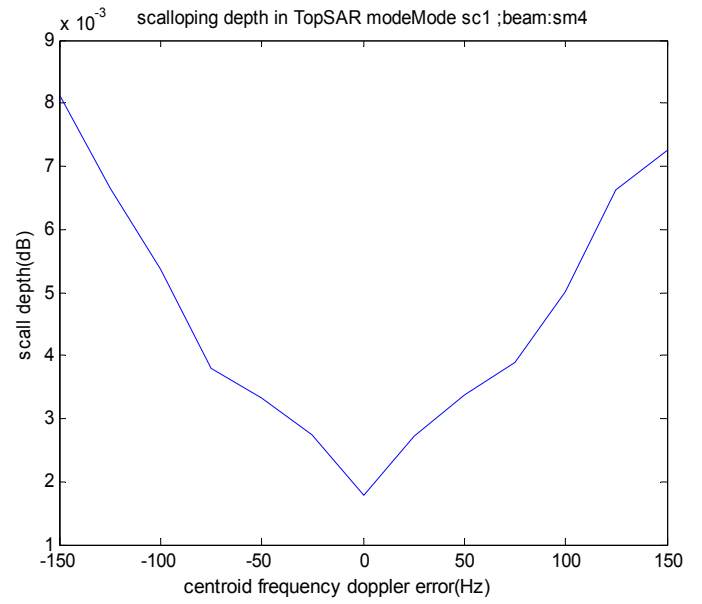
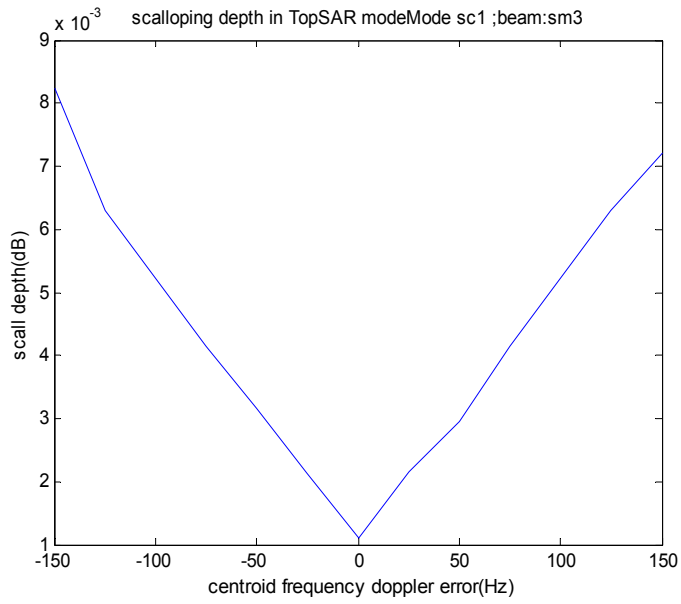
### MODO SC1 Y MODO SC2

	Scalloping Depth without error							
	<u>MODO SC1</u>				<u>MODO SC2</u>			
	BEAM SM1	BEAM SM2	BEAM SM3	BEAM SM4	BEAM SM3	BEAM SM4	BEAM SM5	BEAM SM6
	0,0010	0,0013	0,0010	0,0017	0,0010	0,0017	0,0020	0,0022

	Scalloping Depth with error							
	<u>MODO SC1</u>				<u>MODO SC2</u>			
Frec Error	BEAM SM1	BEAM SM2	BEAM SM3	BEAM SM4	BEAM SM3	BEAM SM4	BEAM SM5	BEAM SM6
-150	0,0071	0,0077	0,0082	0,0081	0,0067	0,0080	0,0082	0,0073
-125	0,0064	0,0064	0,0063	0,0066	0,0064	0,0059	0,0064	0,0056
-100	0,0054	0,0050	0,0052	0,0053	0,0053	0,0053	0,0050	0,0052
-75	0,0041	0,0042	0,0041	0,0037	0,0042	0,0047	0,0040	0,0044
-50	0,0030	0,0029	0,0031	0,0033	0,0032	0,0037	0,0038	0,0032
-25	0,0019	0,0021	0,0021	0,0027	0,0021	0,0024	0,0022	0,0026
0	0,0010	0,0013	0,0010	0,0017	0,0010	0,0017	0,0020	0,0022
25	0,0019	0,0021	0,0021	0,0027	0,0022	0,0025	0,0024	0,0028
50	0,0028	0,0034	0,0029	0,0033	0,0032	0,0033	0,0037	0,0035
75	0,0043	0,0042	0,0041	0,0038	0,0042	0,0044	0,0039	0,0043
100	0,0052	0,0055	0,0052	0,0050	0,0052	0,0056	0,0052	0,0054
125	0,0063	0,0064	0,0062	0,0066	0,0064	0,0061	0,0064	0,0060
150	0,0072	0,0075	0,0072	0,0072	0,0073	0,0069	0,0065	0,0068



## Anexo 5: Profundidad de scalloping para todos los beams de Paz en TopSAR

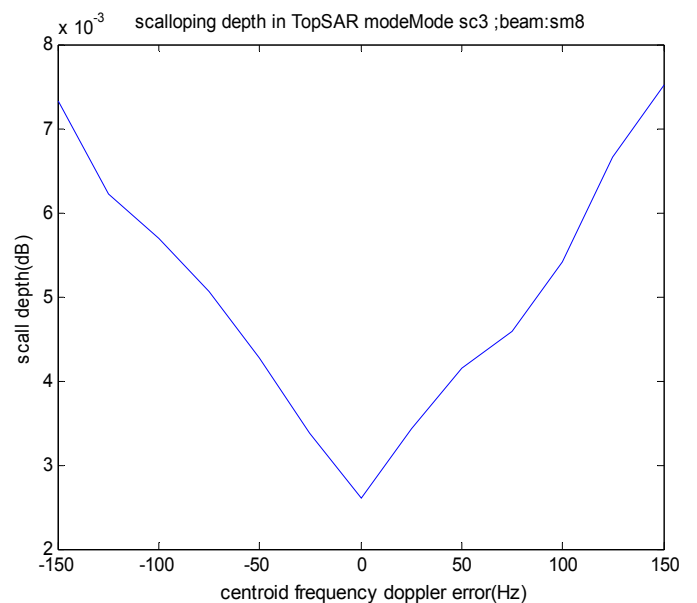
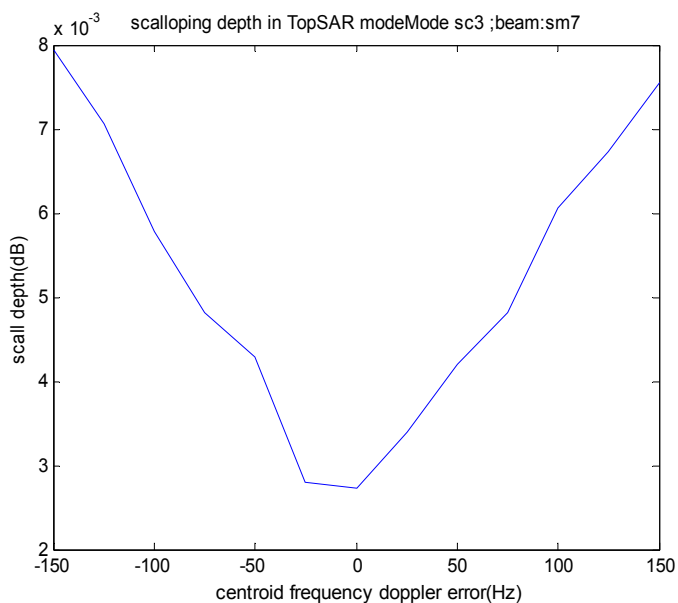




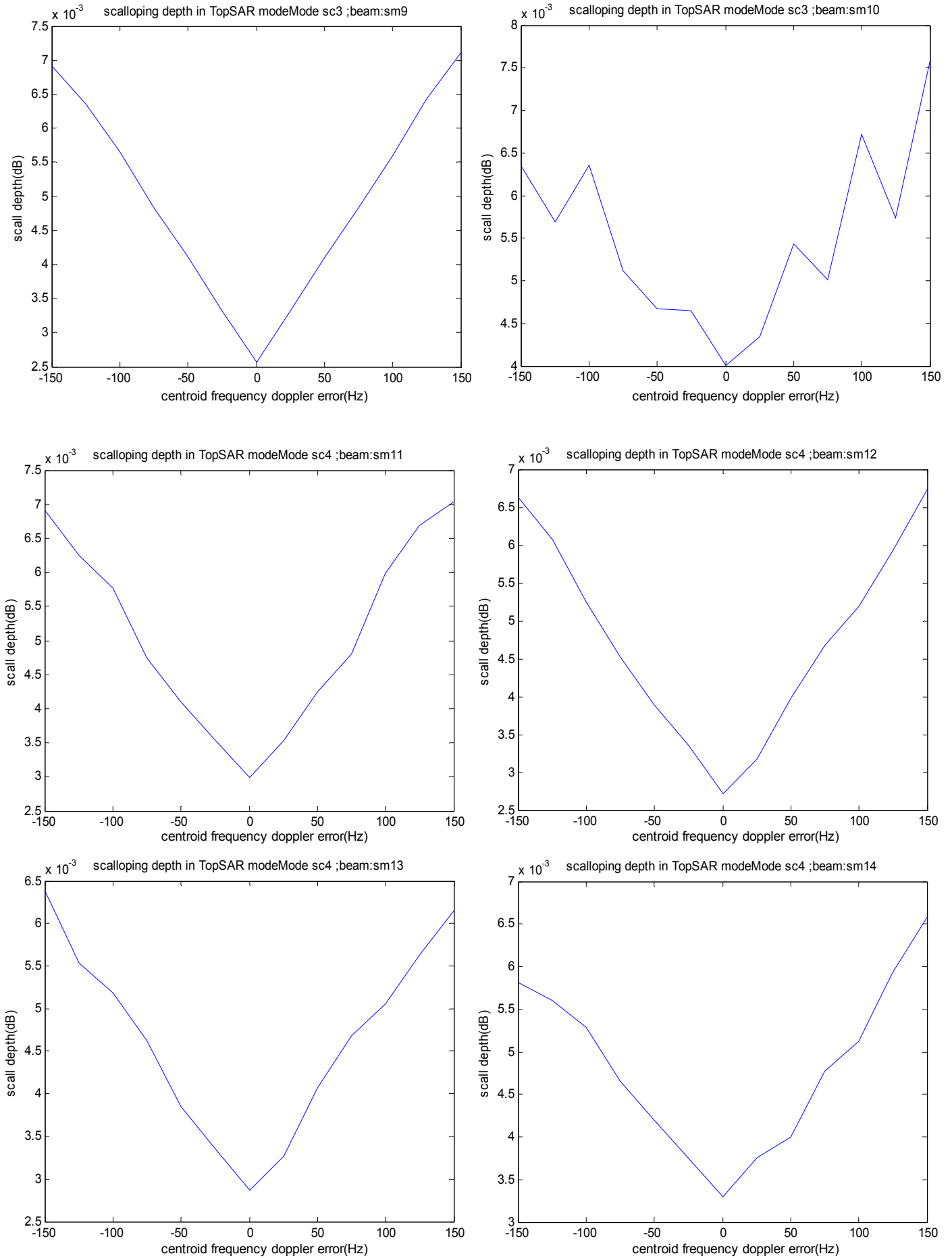
### MODO SC3 Y MODO SC4

	Scalloping Depth without error							
	MODO SC3				MODO SC4			
	BEAM SM7	BEAM SM8	BEAM SM9	BEAM SM10	BEAM SM11	BEAM SM12	BEAM SM13	BEAM SM14
	0,0027	0,0026	0,0025	0,0040	0,0029	0,0027	0,0028	0,0033

	Scalloping Depth with error							
	MODO SC3				MODO SC4			
Frec Error	BEAM SM7	BEAM SM8	BEAM SM9	BEAM SM10	BEAM SM11	BEAM SM12	BEAM SM13	BEAM SM14
-150	0,0079	0,0073	0,0069	0,0063	0,0069	0,0066	0,0063	0,0058
-125	0,0070	0,0062	0,0063	0,0056	0,0062	0,0060	0,0055	0,0056
-100	0,0057	0,0056	0,0056	0,0063	0,0057	0,0052	0,0051	0,0052
-75	0,0048	0,0050	0,0048	0,0051	0,0047	0,0045	0,0046	0,0046
-50	0,0042	0,0042	0,0041	0,0046	0,0040	0,0038	0,0038	0,0042
-25	0,0028	0,0033	0,0033	0,0046	0,0035	0,0033	0,0033	0,0037
0	0,0027	0,0026	0,0025	0,0040	0,0029	0,0027	0,0028	0,0033
25	0,0033	0,0034	0,0033	0,0043	0,0035	0,0031	0,0032	0,0037
50	0,0041	0,0041	0,0041	0,0054	0,0042	0,0039	0,0040	0,0039
75	0,0048	0,0045	0,0048	0,0050	0,0048	0,0046	0,0046	0,0047
100	0,0060	0,0054	0,0055	0,0067	0,0059	0,0051	0,0050	0,0051
125	0,0067	0,0066	0,0064	0,0057	0,0066	0,0059	0,0056	0,0059
150	0,0075	0,0075	0,0071	0,0075	0,0070	0,0067	0,0061	0,0065



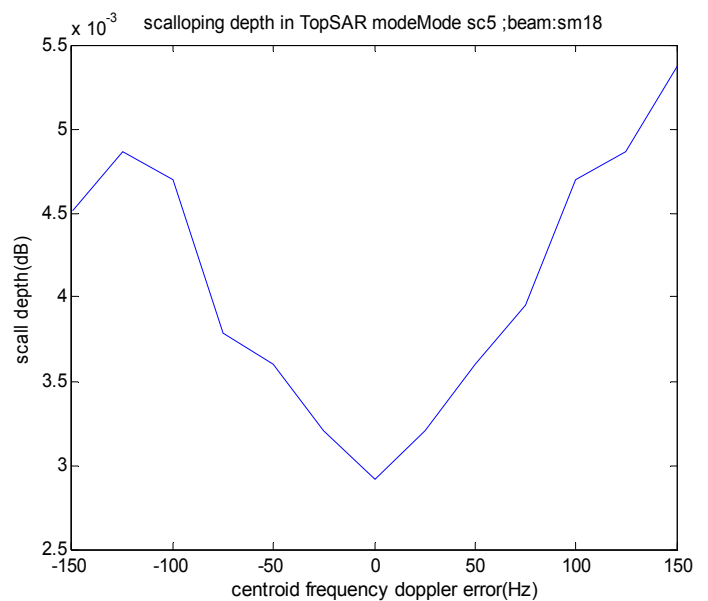
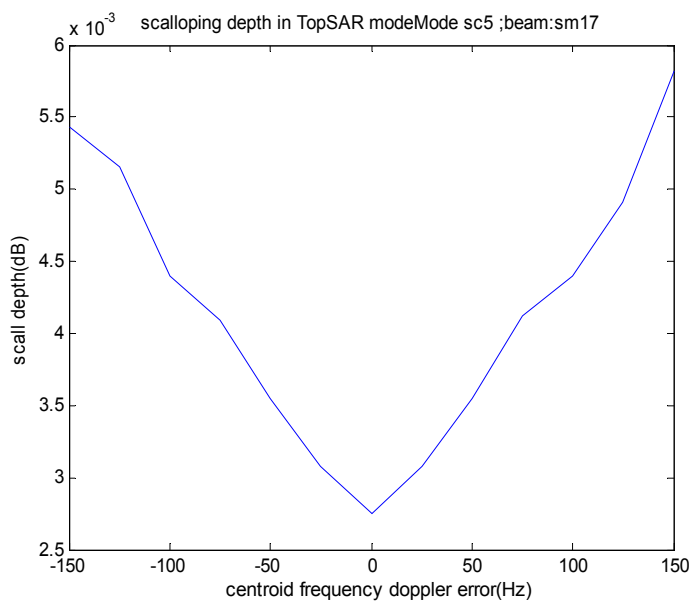
## Anexo 5: Profundidad de scalloping para todos los beams de Paz en TopSAR



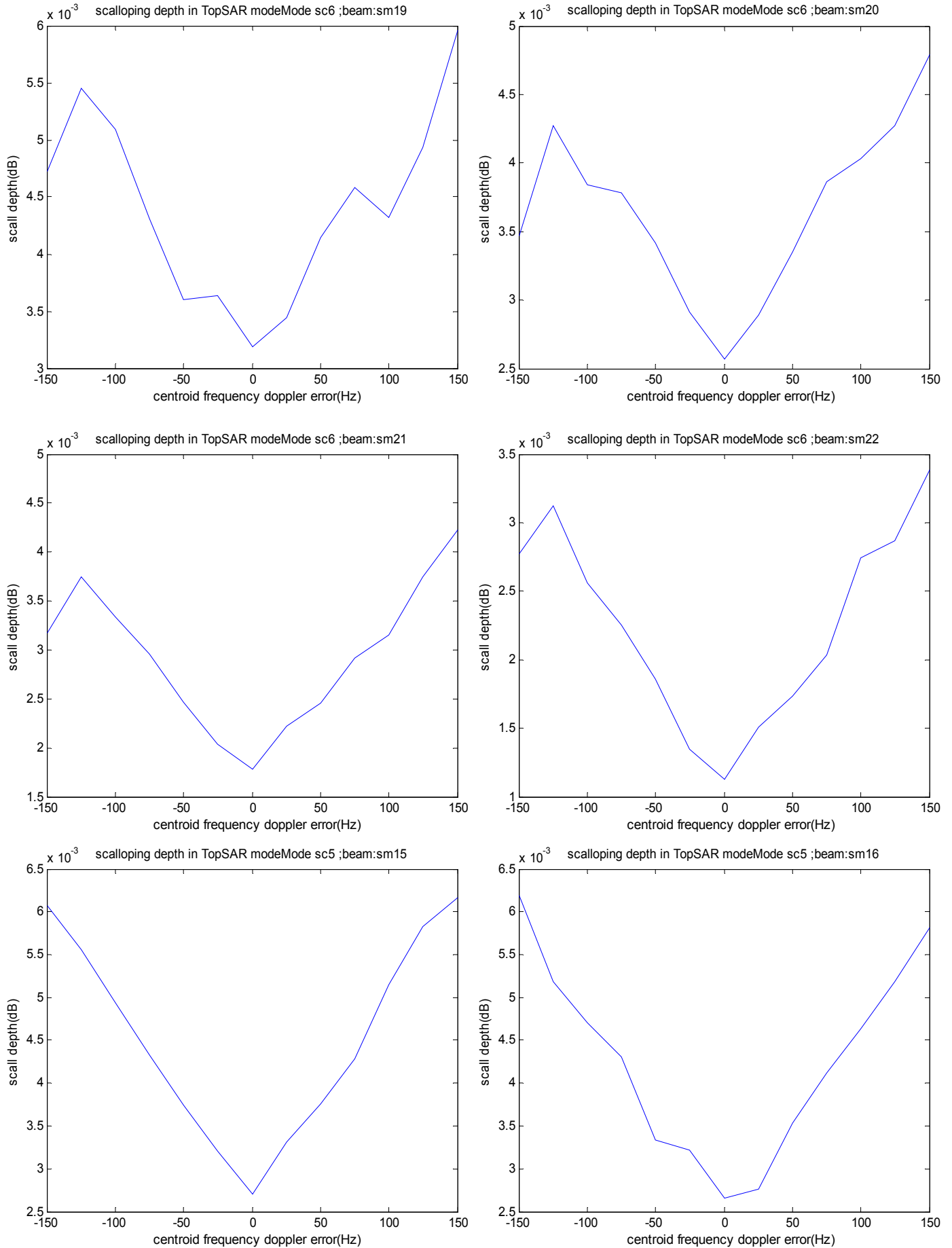
### MODO SC5 Y MODO SC6

	Scalloping Depth without error							
	MODO SC5				MODO SC6			
	BEAM SM15	BEAM SM16	BEAM SM17	BEAM SM18	BEAM SM19	BEAM SM20	BEAM SM21	BEAM SM22
	0,0027	0,0026	0,0027	0,002919	0,0031	0,0025	0,0017	0,0011

	Scalloping Depth with error							
	MODO SC5				MODO SC6			
Frec Error	BEAM SM15	BEAM SM16	BEAM SM17	BEAM SM18	BEAM SM19	BEAM SM20	BEAM SM21	BEAM SM22
-150	0,0060	0,0061	0,0054	0,0045	0,0047	0,0034	0,0031	0,0027
-125	0,0055	0,0051	0,0051	0,0048	0,0054	0,0042	0,0037	0,0031
-100	0,0049	0,0046	0,0044	0,0046	0,0050	0,0038	0,0033	0,0025
-75	0,0043	0,0043	0,0040	0,0037	0,0043	0,0037	0,0029	0,0022
-50	0,0037	0,0033	0,0035	0,0035	0,0036	0,0034	0,0024	0,0018
-25	0,0032	0,0032	0,0030	0,0032	0,0036	0,0029	0,0020	0,0013
0	0,0027	0,0026	0,0027	0,0029	0,0031	0,0025	0,0017	0,0011
25	0,0033	0,0027	0,0030	0,0032	0,0034	0,0028	0,0022	0,0015
50	0,0037	0,0035	0,0035	0,0035	0,0041	0,0033	0,0024	0,0017
75	0,0042	0,0041	0,0041	0,0039	0,0045	0,0038	0,0029	0,0020
100	0,0051	0,0046	0,0044	0,0046	0,0043	0,0040	0,0031	0,0027
125	0,0058	0,0051	0,0049	0,0048	0,0049	0,0042	0,0037	0,0028
150	0,0061	0,0058	0,0058	0,0053	0,0059	0,0047	0,0042	0,0033



## Anexo 5: Profundidad de scalloping para todos los beams de Paz en TopSAR

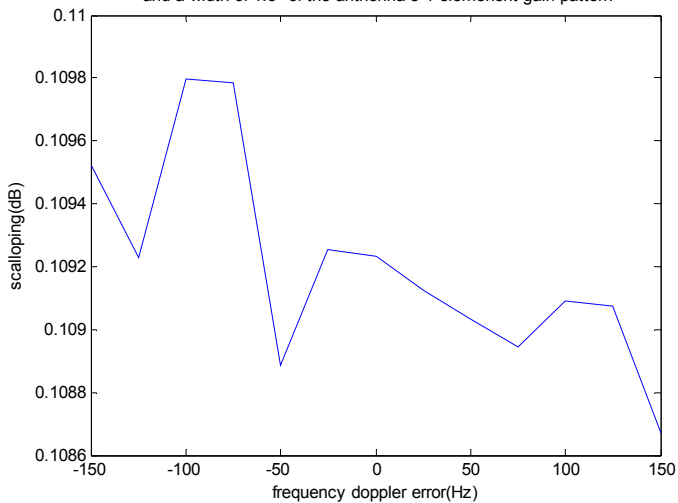


**Anexo 6: Análisis de escenarios para Paz TopSAR del beam SM1**

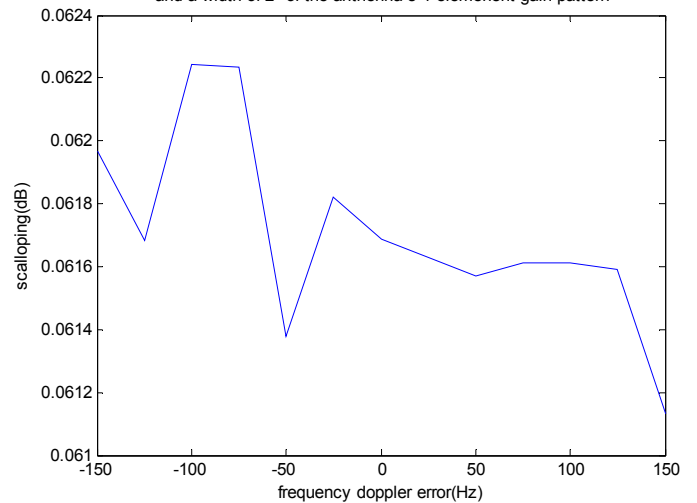
- MODE:SC1 BEAM:SM1
- ERROR FRECUENCIA DOPPLER CENTROID DE 1 ELEMENTO DEL ARRAY:NO
- PONDERACION:NO
- ANCHURA DE HAZ DE UN UNICO ELEMENTO DEL ARRAY:1.5°,2°,3°,4°

Frequency error	Scalloping power(dB)			
	Width=1.5°	Width=2°	Width=3°	Width=4°
-150	0,1095	0,0619	0,0280	0,0161
-125	0,1092	0,0616	0,0277	0,0160
-100	0,1097	0,0622	0,0282	0,0163
-75	0,1097	0,0622	0,0282	0,0163
-50	0,1088	0,0613	0,0276	0,0160
-25	0,1092	0,0618	0,0279	0,0160
0	0,1092	0,0616	0,0278	0,0160
25	0,1091	0,0616	0,0277	0,0159
50	0,1090	0,0615	0,0277	0,0159
75	0,1089	0,0616	0,0279	0,0162
100	0,1090	0,0616	0,0277	0,0159
125	0,1090	0,0615	0,0277	0,0159
150	0,1086	0,0611	0,0275	0,0158

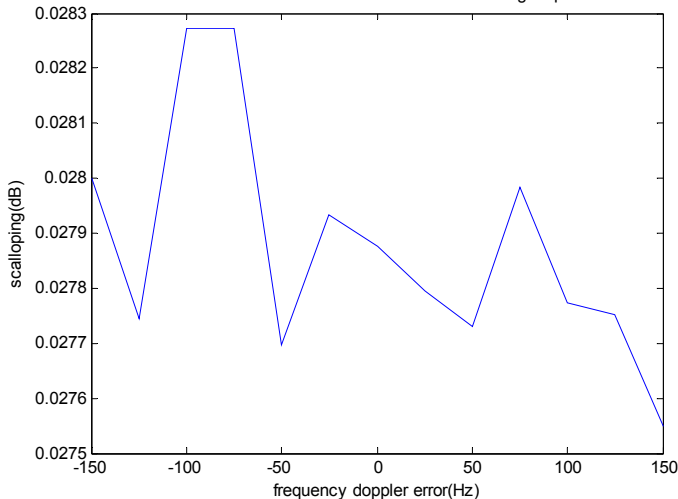
scalloping for the beam SM1 with no error (and no ponderation) and a width of 1.5° of the antenna's 1 element gain pattern



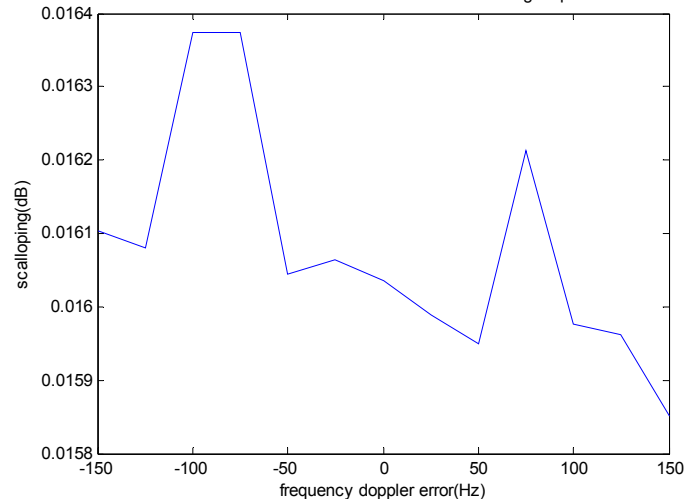
scalloping for the beam SM1 with no error (and no ponderation) and a width of 2° of the antenna's 1 element gain pattern



scalloping for the beam SM1 with no error (and no ponderation) and a width of 3° of the antenna's 1 element gain pattern

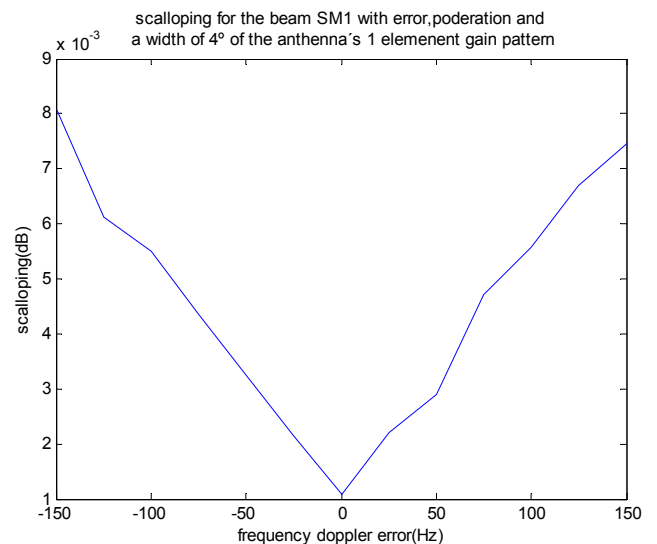
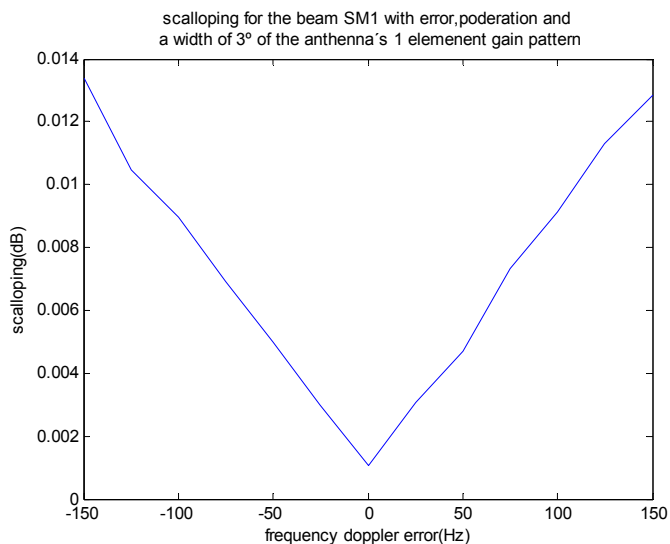
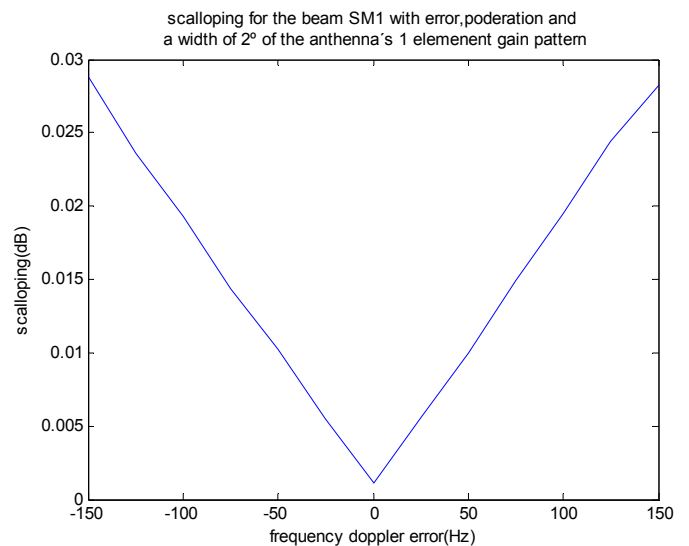
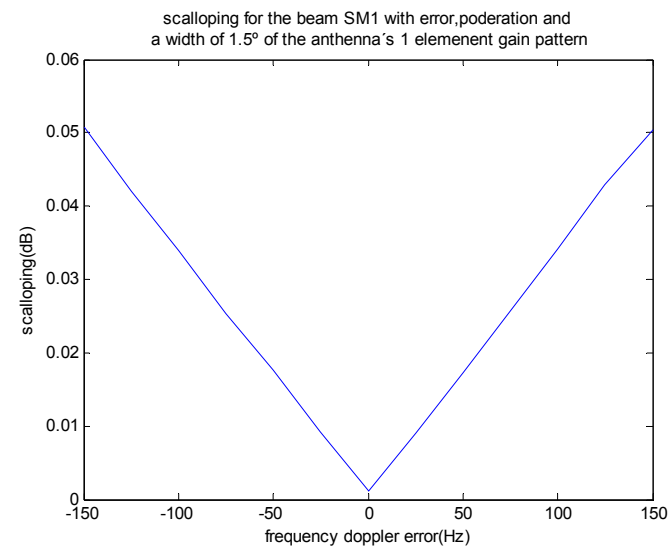


scalloping for the beam SM1 with no error (and no ponderation) and a width of 4° of the antenna's 1 element gain pattern



- MODE:SC1 BEAM:SM1
- ERROR FRECUENCIA DOPPLER CENTROID DE 1 ELEMENTO DEL ARRAY:SI(VARIABLE)
- PONDERACION:SI
- ANCHURA DE HAZ DE UN UNICO ELEMENTO DEL ARRAY:1.5°,2°,3°,4°

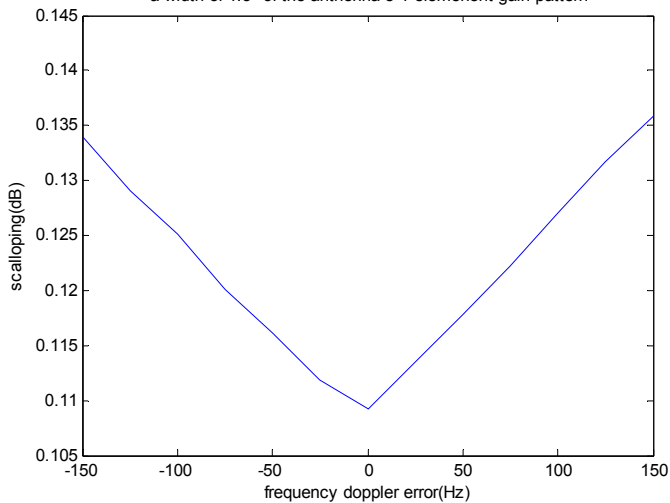
Frequency error	Scalloping power(dB)			
	Width=1.5°	Width=2°	Width=3°	Width=4°
-150	0,0507	0,0288	0,0134	0,0080
-125	0,0420	0,0236	0,0104	0,0061
-100	0,0339	0,0192	0,0089	0,0055
-75	0,0252	0,0144	0,0069	0,0043
-50	0,0176	0,0102	0,0050	0,0032
-25	0,0091	0,0054	0,0029	0,0021
0	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010
25	0,0091	0,0055	0,0030	0,0022
50	0,0173	0,0099	0,0047	0,0028
75	0,0257	0,0149	0,0073	0,0047
100	0,0341	0,0195	0,0091	0,0055
125	0,0428	0,0244	0,0112	0,0067
150	0,0503	0,0282	0,0128	0,0074



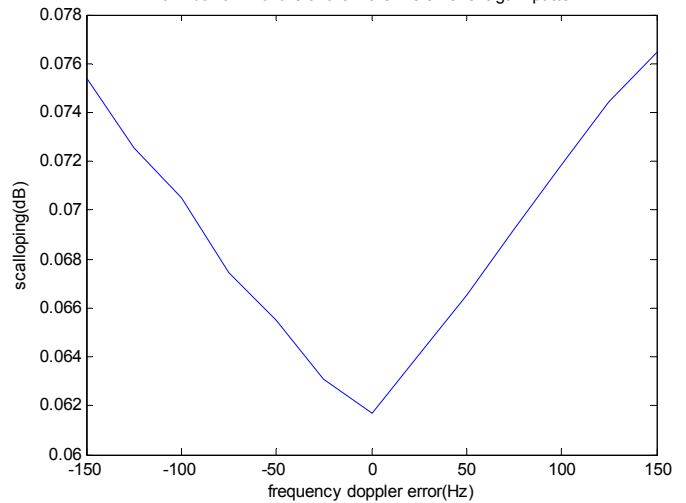
- MODE:SC1 BEAM:SM1
- ERROR FRECUENCIA DOPPLER CENTROID DE 1 ELEMENTO DEL ARRAY:SI(VARIABLE)
- PONDERACION:NO
- ANCHURA DE HAZ DE UN UNICO ELEMENTO DEL ARRAY:1.5°,2°,3°,4°

Frequency error	Scalloping power(dB)			
	Width=1.5°	Width=2°	Width=3°	Width=4°
-150	0,0196	0,1340	0,0754	0,0339
-125	0,0185	0,1290	0,0725	0,0325
-100	0,0184	0,1250	0,0705	0,0319
-75	0,0175	0,1200	0,0674	0,0304
-50	0,0171	0,1161	0,0655	0,0297
-25	0,0165	0,1118	0,0631	0,0286
0	0,0160	0,1092	0,0616	0,0278
25	0,0166	0,1135	0,0640	0,0289
50	0,0170	0,1178	0,0665	0,0298
75	0,0181	0,1222	0,0692	0,0313
100	0,0185	0,1270	0,0718	0,0323
125	0,0192	0,1316	0,0744	0,0335
150	0,0196	0,1358	0,0764	0,0343

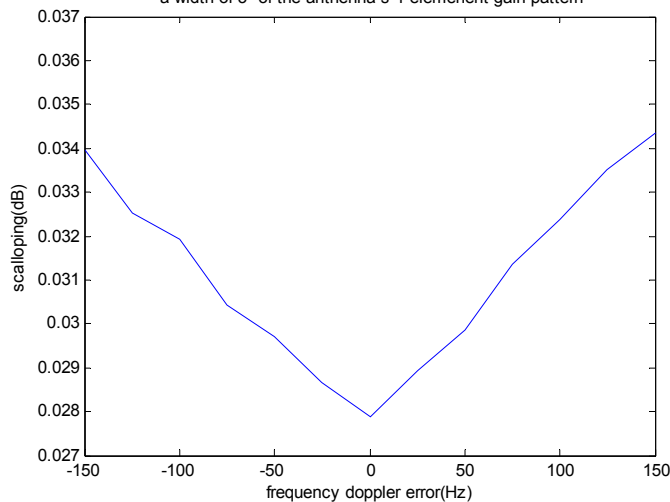
scalloping for the beam SM1 with error without ponderation and a width of 1.5° of the antenna's 1 element gain pattern



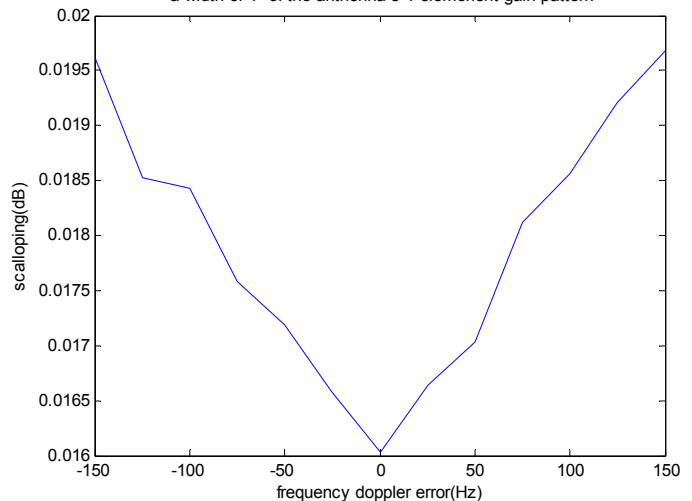
scalloping for the beam SM1 with error without ponderation and a width of 2° of the antenna's 1 element gain pattern



scalloping for the beam SM1 with error without ponderation and a width of 3° of the antenna's 1 element gain pattern



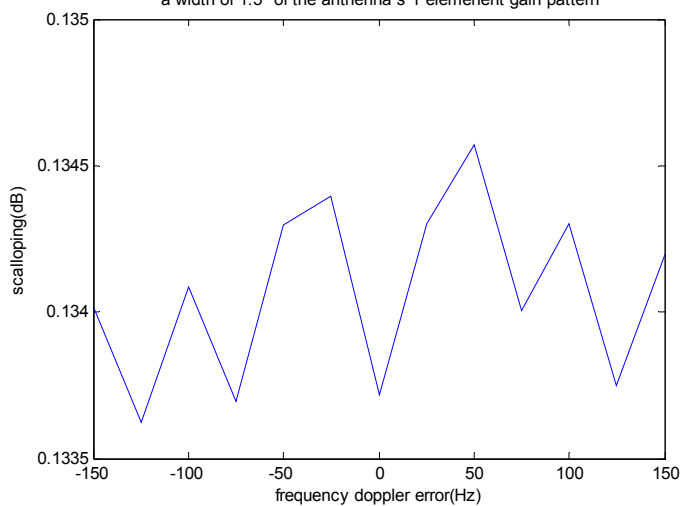
scalloping for the beam SM1 with error without ponderation and a width of 4° of the antenna's 1 element gain pattern



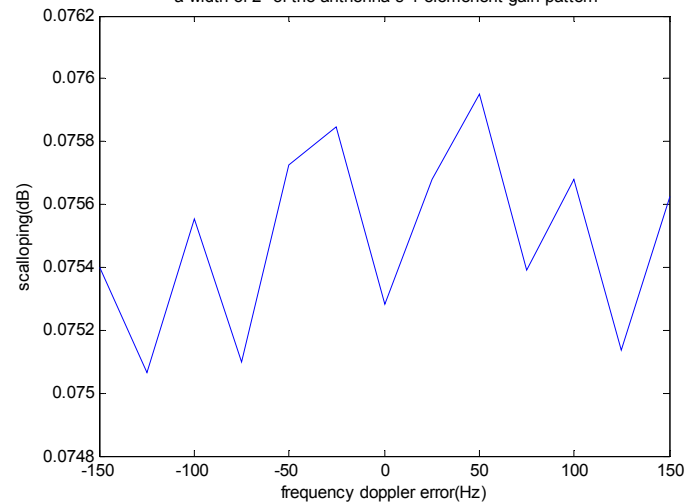
- MODE:SC1 BEAM:SM1
- ERROR FRECUENCIA DOPPLER CENTROID DE 1 ELEMENTO DEL ARRAY:SI(-150Hz)
- PONDERACION:NO
- ANCHURA DE HAZ DE UN UNICO ELEMENTO DEL ARRAY:1.5°,2°,3°,4°

Frequency error	Scalloping power(dB)			
	Width=1.5°	Width=2°	Width=3°	Width=4°
-150	0,1340	0,0754	0,0339	0,0196
-125	0,1336	0,0750	0,0335	0,0191
-100	0,1340	0,0755	0,0340	0,0196
-75	0,1336	0,0751	0,0337	0,0194
-50	0,1342	0,0757	0,0342	0,0197
-25	0,1343	0,0758	0,0343	0,0197
0	0,1337	0,0752	0,0339	0,0194
25	0,1343	0,0756	0,0340	0,0195
50	0,1345	0,0759	0,0343	0,0197
75	0,1340	0,0753	0,0338	0,0192
100	0,1343	0,0756	0,0340	0,0195
125	0,1337	0,0751	0,0335	0,0190
150	0,1342	0,0756	0,0340	0,0195

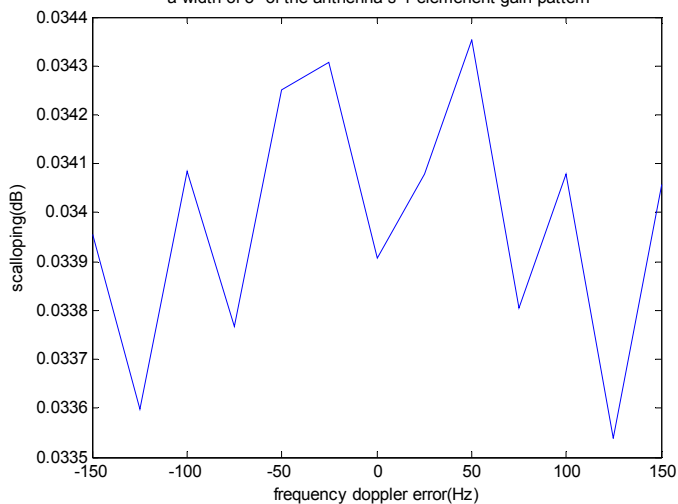
scalloping for the beam SM1 with error of -150Hz without ponderation and a width of 1.5° of the antenna's 1 element gain pattern



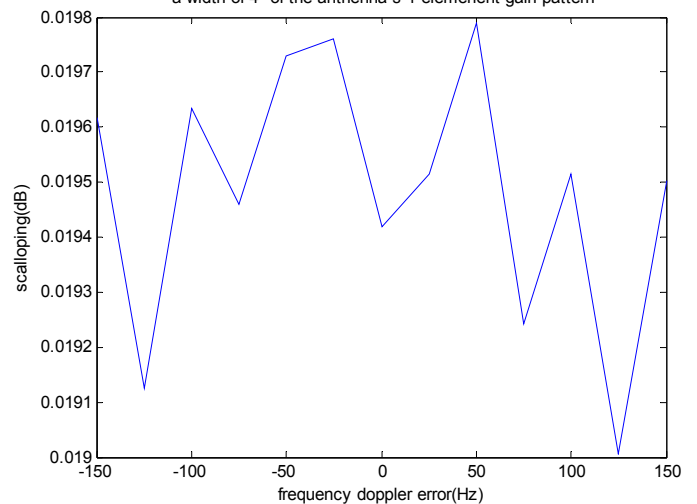
scalloping for the beam SM1 with error of -150Hz without ponderation and a width of 2° of the antenna's 1 element gain pattern



scalloping for the beam SM1 with error of -150Hz without ponderation and a width of 3° of the antenna's 1 element gain pattern



scalloping for the beam SM1 with error of -150Hz without ponderation and a width of 4° of the antenna's 1 element gain pattern

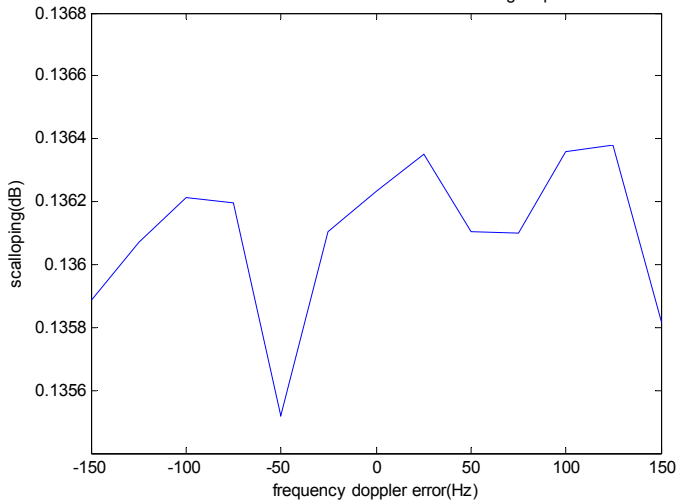




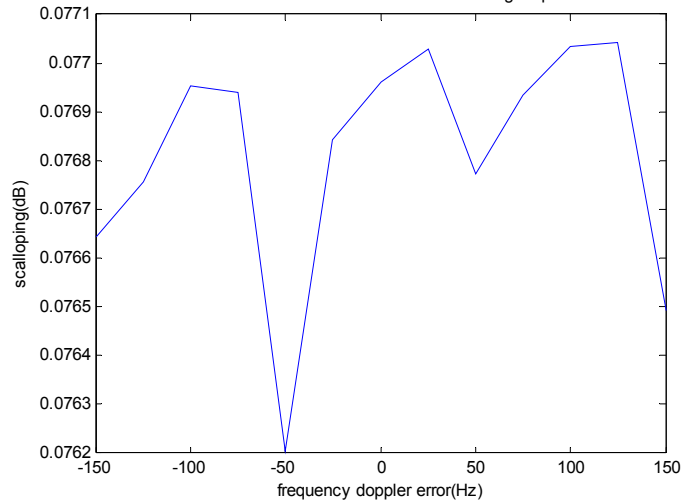
- MODE:SC1 BEAM:SM1
- ERROR FRECUENCIA DOPPLER CENTROID DE 1 ELEMENTO DEL ARRAY:SI(+150Hz)
- PONDERACION:NO
- ANCHURA DE HAZ DE UN UNICO ELEMENTO DEL ARRAY:1.5°,2°,3°,4°

Frequency error	Scalloping power(dB)			
	Width=1.5°	Width=2°	Width=3°	Width=4°
-150	0,1358	0,0766	0,0344	0,0197
-125	0,1360	0,0767	0,0345	0,0200
-100	0,1362	0,0769	0,0347	0,0200
-75	0,1361	0,0769	0,0347	0,0200
-50	0,1355	0,0762	0,0340	0,0195
-25	0,1361	0,0768	0,0346	0,0198
0	0,1362	0,0769	0,0346	0,0198
25	0,1363	0,0770	0,0346	0,0198
50	0,1361	0,0767	0,0344	0,0195
75	0,1360	0,0769	0,0348	0,0200
100	0,1363	0,0770	0,0346	0,0198
125	0,1363	0,0770	0,0346	0,0198
150	0,1358	0,0764	0,0343	0,0196

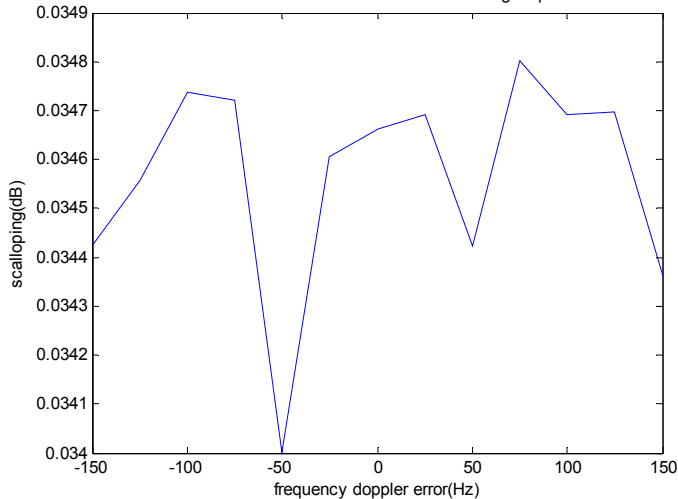
scalloping for the beam SM1 with error of +150Hz without ponderation and a width of 1.5° of the antenna's 1 element gain pattern



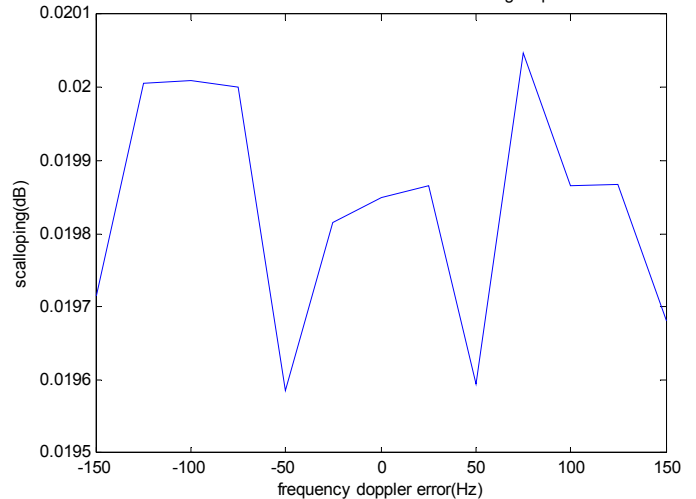
scalloping for the beam SM1 with error of +150Hz without ponderation and a width of 2° of the antenna's 1 element gain pattern



scalloping for the beam SM1 with error of +150Hz without ponderation and a width of 3° of the antenna's 1 element gain pattern



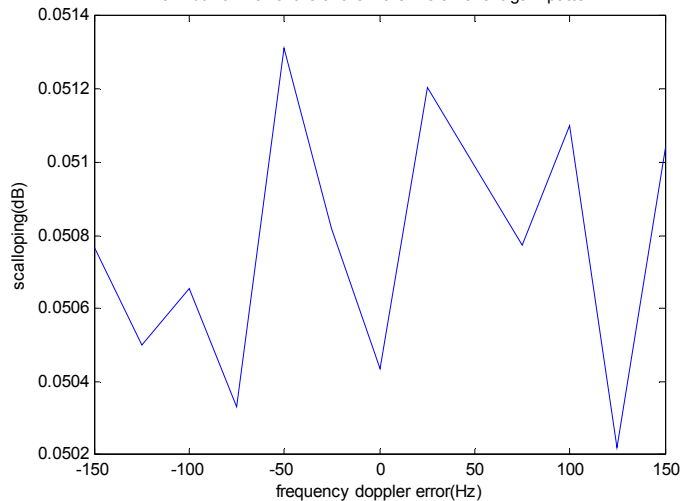
scalloping for the beam SM1 with error of +150Hz without ponderation and a width of 4° of the antenna's 1 element gain pattern



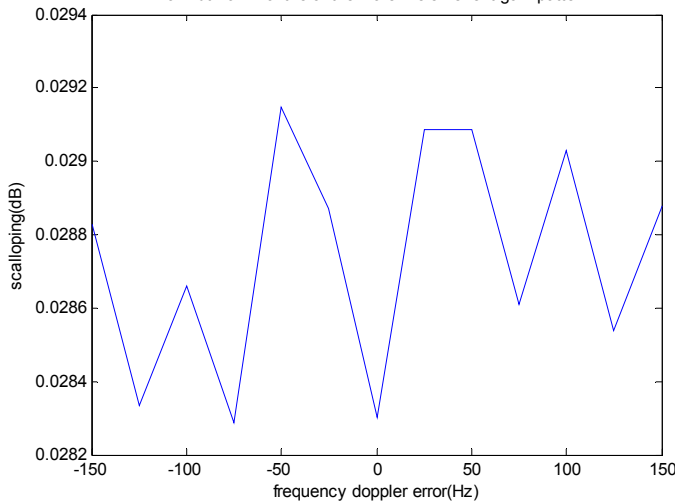
- MODE:SC1 BEAM:SM1
- ERROR FRECUENCIA DOPPLER CENTROID DE 1 ELEMENTO DEL ARRAY:SI(-150Hz)
- PONDERACION:SI
- ANCHURA DE HAZ DE UN UNICO ELEMENTO DEL ARRAY:1.5°,2°,3°,4°

Frequency error	Scalloping power(dB)			
	Width=1.5°	Width=2°	Width=3°	Width=4°
-150	0,0507	0,0288	0,0134	0,0080
-125	0,0505	0,0283	0,0125	0,0072
-100	0,0506	0,0286	0,0130	0,0077
-75	0,0503	0,0282	0,0128	0,0076
-50	0,0513	0,0291	0,0133	0,0078
-25	0,0508	0,0288	0,0132	0,0078
0	0,0504	0,0283	0,0128	0,0074
25	0,0512	0,0290	0,0133	0,0078
50	0,0509	0,0290	0,0135	0,0080
75	0,0507	0,0286	0,0128	0,0073
100	0,0510	0,0290	0,0133	0,0078
125	0,0502	0,0285	0,0131	0,0078
150	0,0510	0,0288	0,0131	0,0078

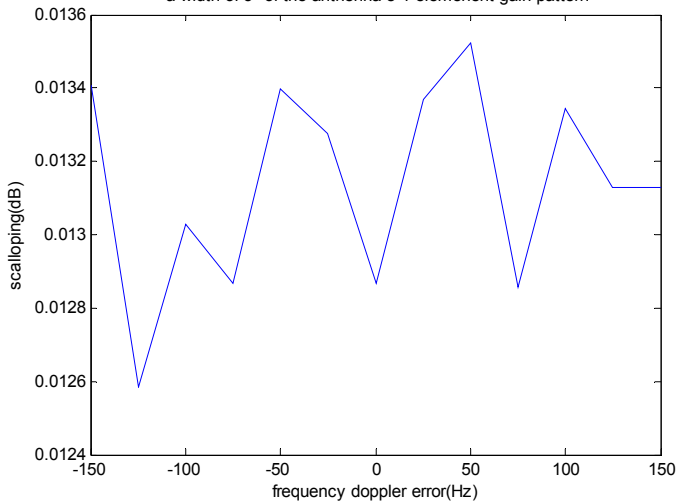
scalloping for the beam SM1 with error of -150Hz with ponderation and a width of 1.5° of the anthenna's 1 element gain pattern



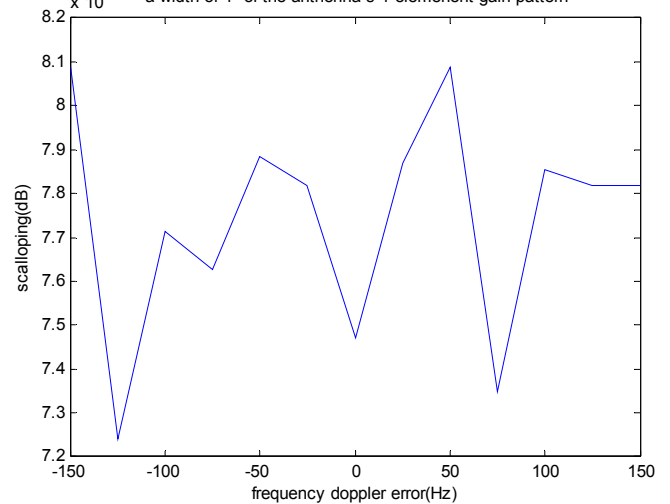
scalloping for the beam SM1 with error of -150Hz with ponderation and a width of 2° of the anthenna's 1 element gain pattern



scalloping for the beam SM1 with error of -150Hz with ponderation and a width of 3° of the anthenna's 1 element gain pattern

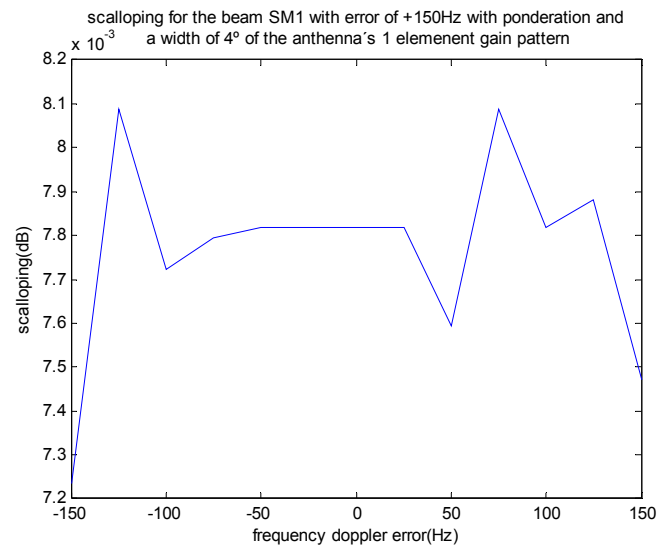
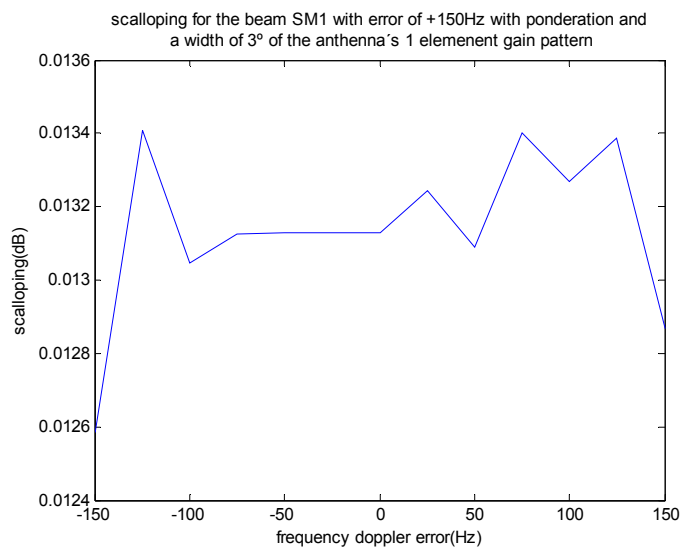
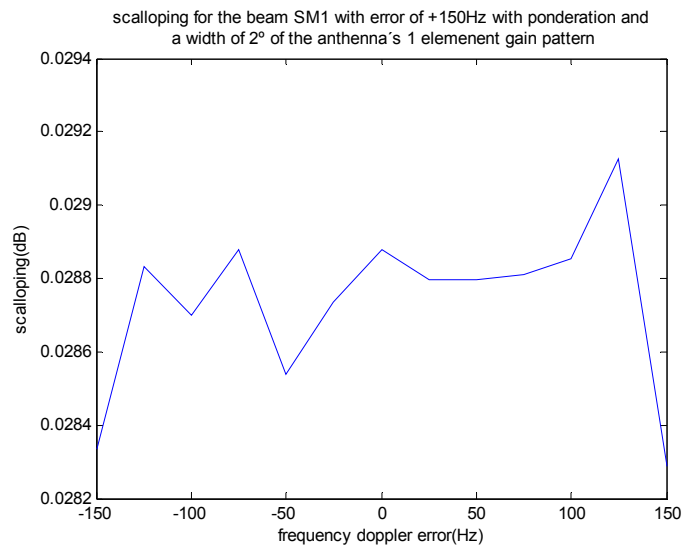
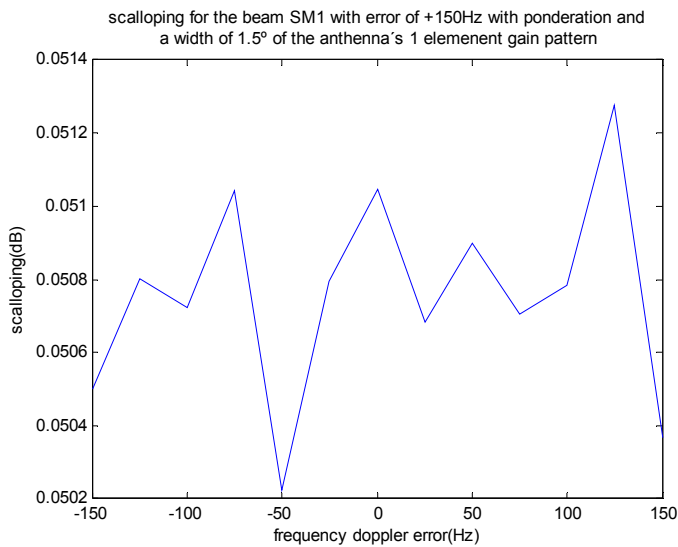


scalloping for the beam SM1 with error of -150Hz with ponderation and a width of 4° of the anthenna's 1 element gain pattern



- MODE:SC1 BEAM:SM1
- ERROR FRECUENCIA DOPPLER CENTROID DE 1 ELEMENTO DEL ARRAY:SI(+150Hz)
- PONDERACION:SI
- ANCHURA DE HAZ DE UN UNICO ELEMENTO DEL ARRAY:1.5°,2°,3°,4°

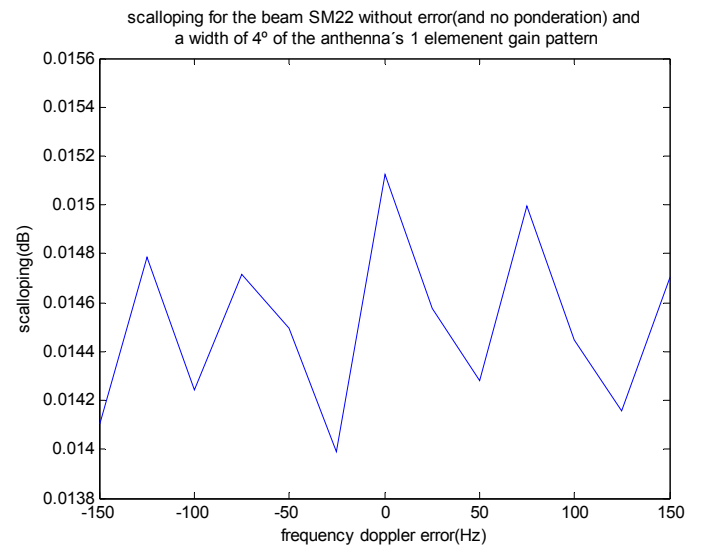
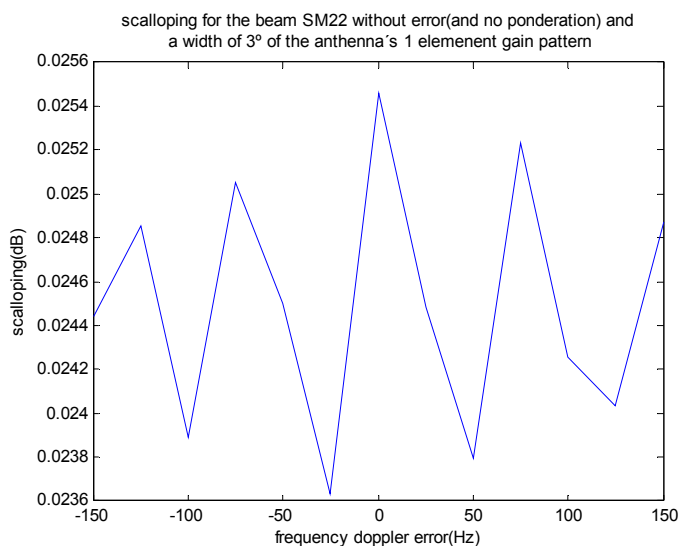
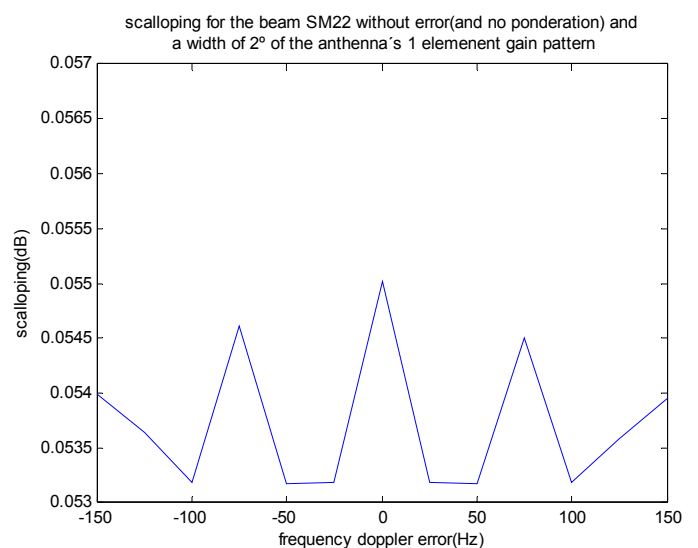
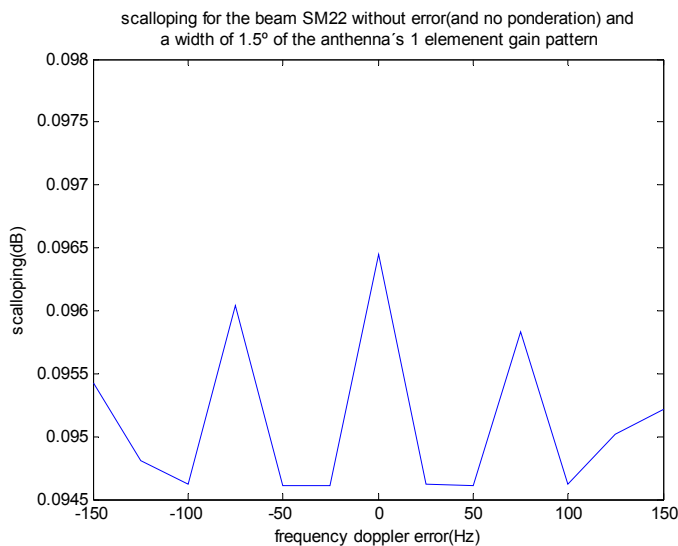
Frequency error	Scalloping power(dB)			
	Width=1.5°	Width=2°	Width=3°	Width=4°
-150	0,0505	0,0283	0,0125	0,0072
-125	0,0508	0,0288	0,0134	0,0080
-100	0,0507	0,0286	0,0130	0,0077
-75	0,0510	0,0288	0,0131	0,0077
-50	0,0502	0,0285	0,0131	0,0078
-25	0,0507	0,0287	0,0131	0,0078
0	0,0510	0,0288	0,0131	0,0078
25	0,0506	0,0287	0,0132	0,0078
50	0,0508	0,0287	0,0130	0,0075
75	0,0507	0,0288	0,0134	0,0080
100	0,0507	0,0288	0,0132	0,0078
125	0,0512	0,0291	0,0133	0,0078
150	0,0503	0,0282	0,0128	0,0074



**Anexo 7: Análisis de escenarios para Paz TopSAR del beam SM22**

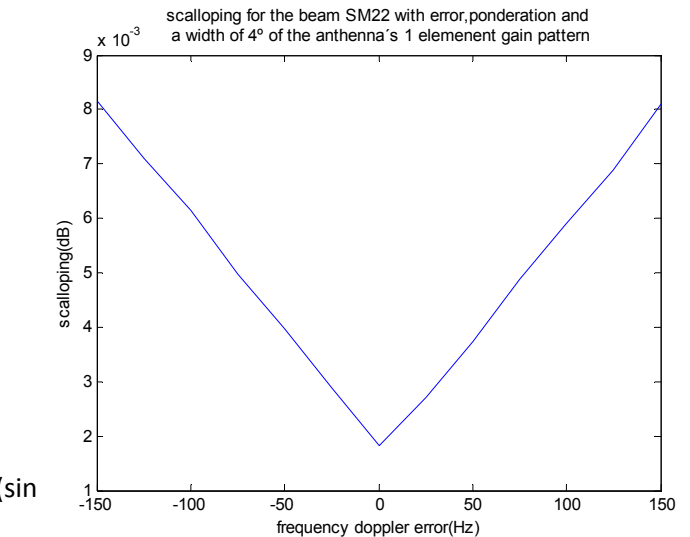
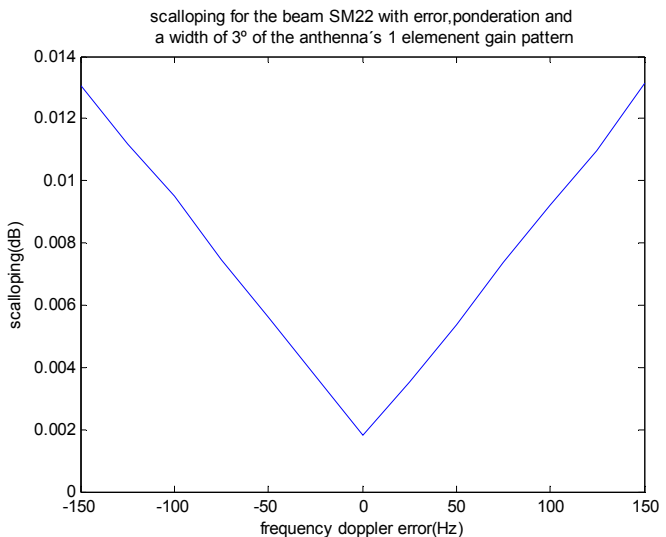
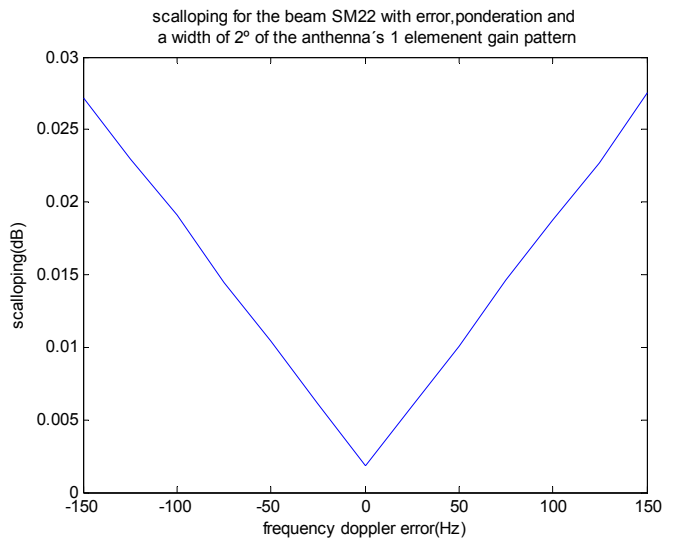
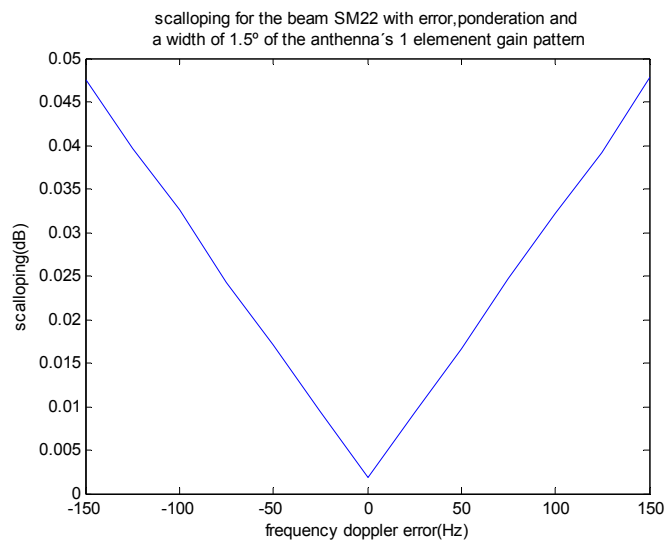
- MODE:SC6 BEAM:SM22
- ERROR FRECUENCIA DOPPLER CENTROID DE 1 ELEMENTO DEL ARRAY:NO
- PONDERACION:NO
- ANCHURA DE HAZ DE UN UNICO ELEMENTO DEL ARRAY:1.5°,2°,3°,4°

Frequency error	Scalloping power(dB)			
	Width=1.5°	Width=2°	Width=3°	Width=4°
-150	0,0954	0,0539	0,0244	0,0141
-125	0,0948	0,0536	0,0248	0,0147
-100	0,0946	0,0531	0,0238	0,0142
-75	0,0960	0,0546	0,0250	0,0147
-50	0,0946	0,0531	0,0244	0,0144
-25	0,0946	0,0531	0,0236	0,0139
0	0,0964	0,0550	0,0254	0,0151
25	0,0946	0,0531	0,0244	0,0145
50	0,0946	0,0531	0,0237	0,0142
75	0,0958	0,0544	0,0252	0,0149
100	0,0946	0,0531	0,0242	0,0144
125	0,0950	0,0535	0,0240	0,0141
150	0,0952	0,0539	0,0248	0,0147



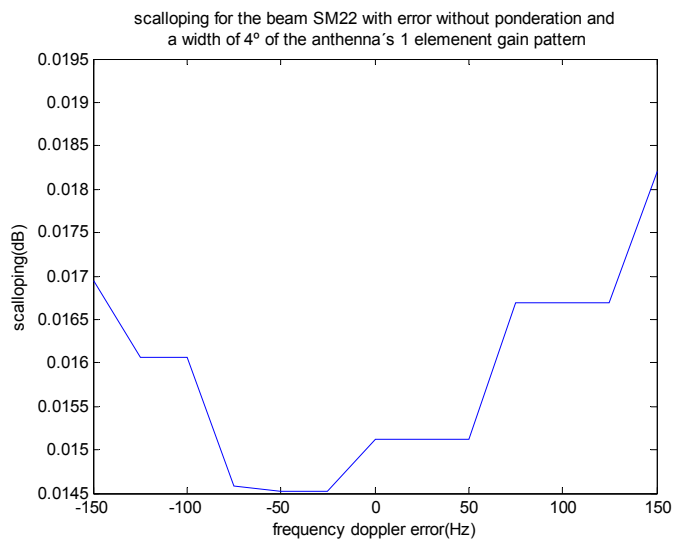
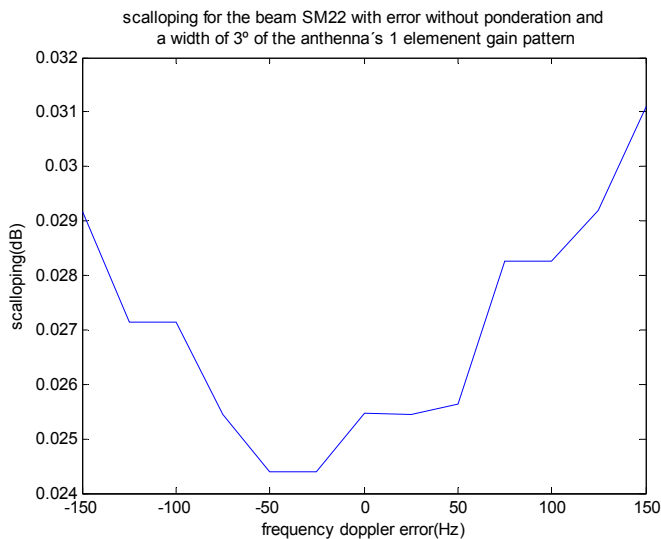
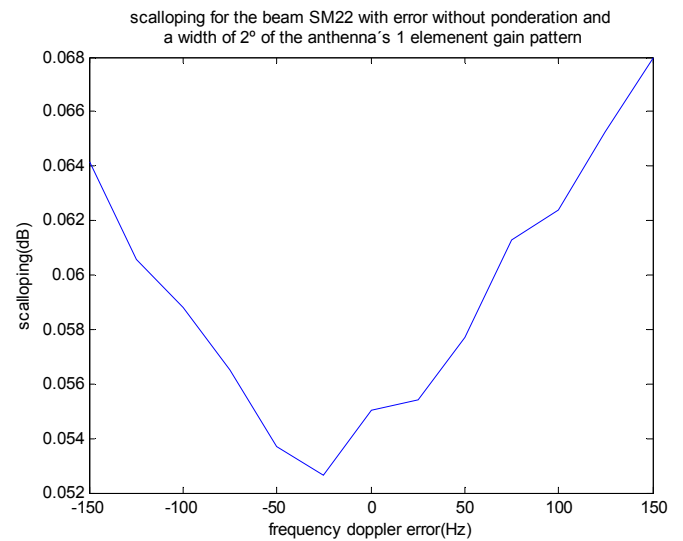
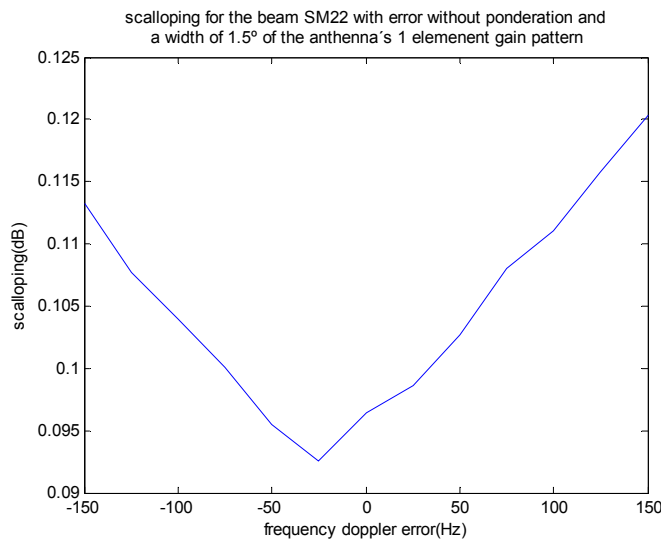
- MODE:SC6 BEAM:SM22
- ERROR FRECUENCIA DOPPLER CENTROID DE 1 ELEMENTO DEL ARRAY:SI(VARIABLE)
- PONDERACION:SI
- ANCHURA DE HAZ DE UN UNICO ELEMENTO DEL ARRAY:1.5°,2°,3°,4°

Frequency error	Scalloping power(dB)			
	Width=1.5°	Width=2°	Width=3°	Width=4°
-150	0,0474	0,0271	0,0130	0,0081
-125	0,0396	0,0229	0,0111	0,0070
-100	0,0325	0,0190	0,0094	0,0061
-75	0,0243	0,0144	0,0074	0,0049
-50	0,0170	0,0103	0,0056	0,0039
-25	0,0095	0,0061	0,0037	0,0029
0	0,0018	0,0018	0,0018	0,0018
25	0,0092	0,0059	0,0035	0,0026
50	0,0166	0,0100	0,0053	0,0037
75	0,0247	0,0146	0,0073	0,0048
100	0,0321	0,0187	0,0092	0,0059
125	0,0391	0,0226	0,0109	0,0068
150	0,0478	0,0275	0,0131	0,0081



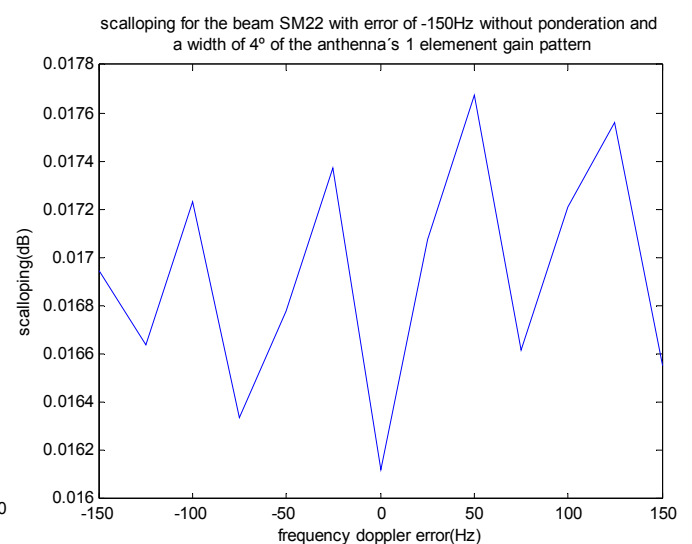
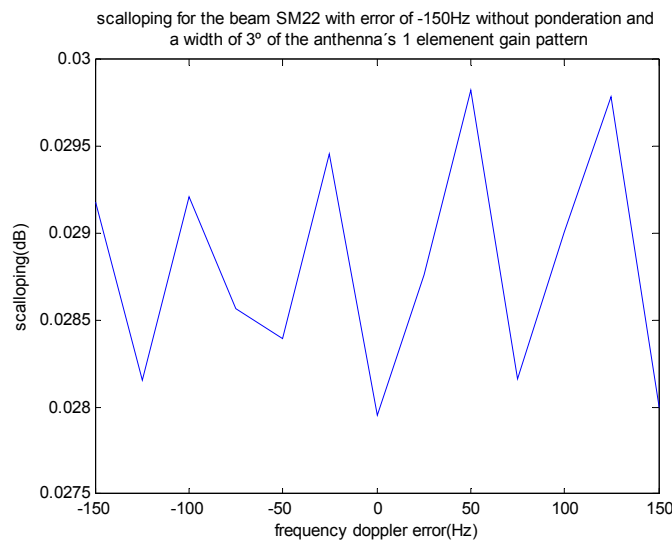
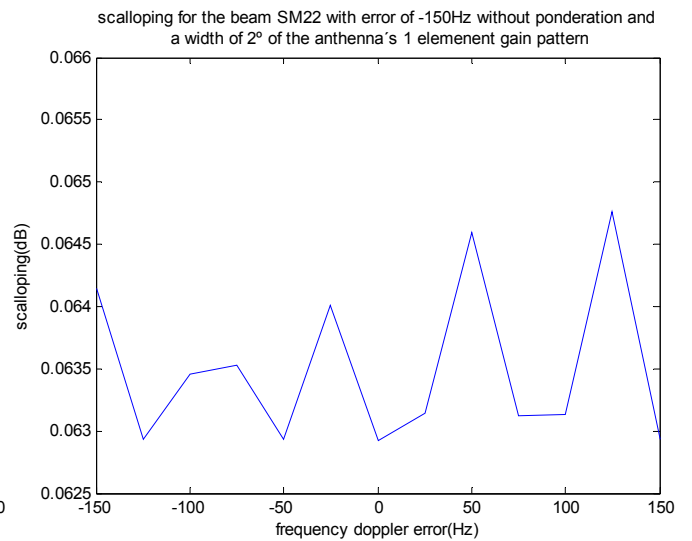
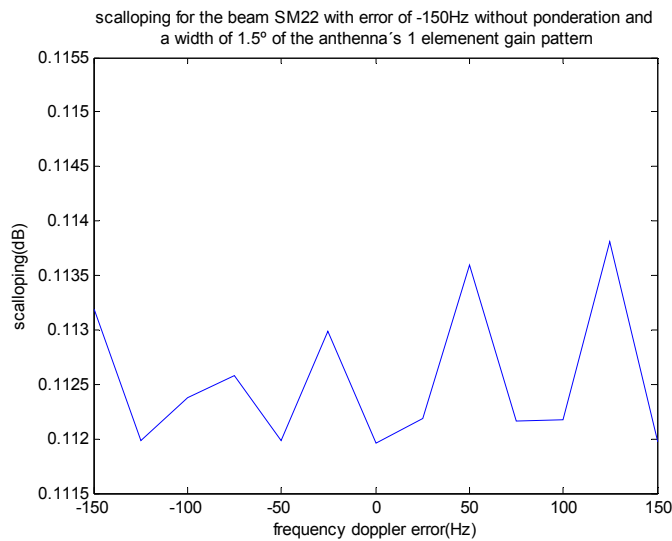
- MODE:SC6 BEAM:SM22
- ERROR FRECUENCIA DOPPLER CENTROID DE 1 ELEMENTO DEL ARRAY:SI(VARIABLE)
- PONDERACION:NO
- ANCHURA DE HAZ DE UN UNICO ELEMENTO DEL ARRAY:1.5°,2°,3°,4°

Frequency error	Scalloping power(dB)			
	Width=1.5°	Width=2°	Width=3°	Width=4°
-150	0,1131	0,0641	0,0291	0,0169
-125	0,1077	0,0605	0,0271	0,0160
-100	0,1039	0,0587	0,0271	0,0160
-75	0,1000	0,0565	0,0254	0,0145
-50	0,0954	0,0536	0,0243	0,0145
-25	0,0925	0,0526	0,0244	0,0145
0	0,0964	0,0550	0,0254	0,0151
25	0,0986	0,0554	0,0254	0,0151
50	0,1026	0,0577	0,0256	0,0151
75	0,1080	0,0613	0,0282	0,0166
100	0,1110	0,0624	0,0282	0,0166
125	0,1157	0,0652	0,0292	0,0166
150	0,1203	0,0679	0,0310	0,0182



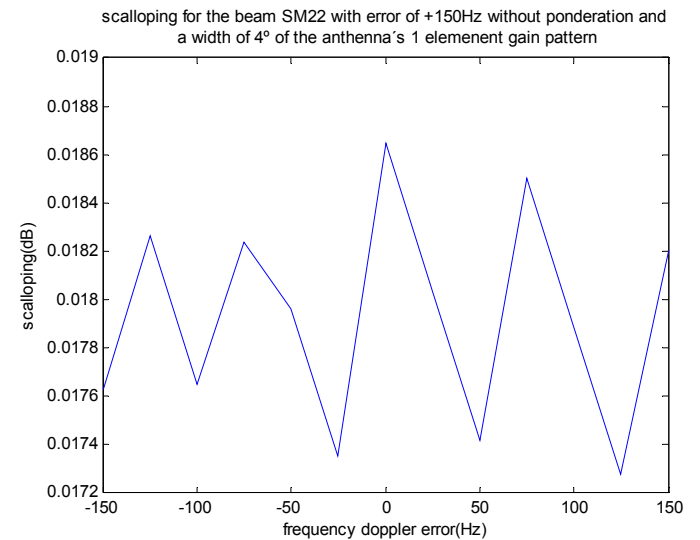
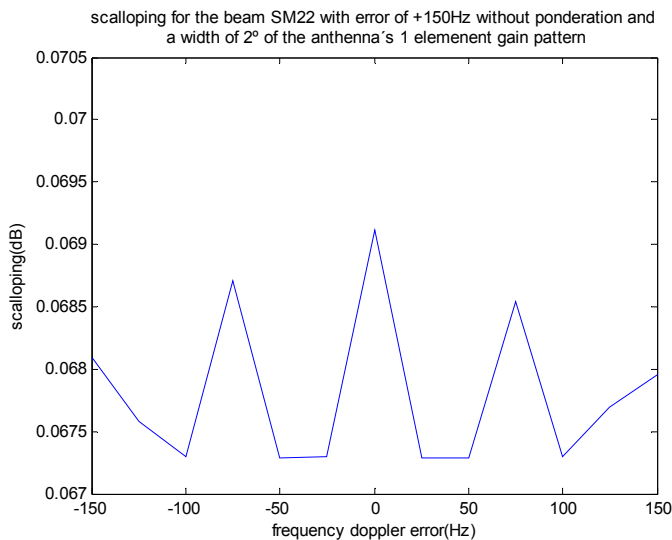
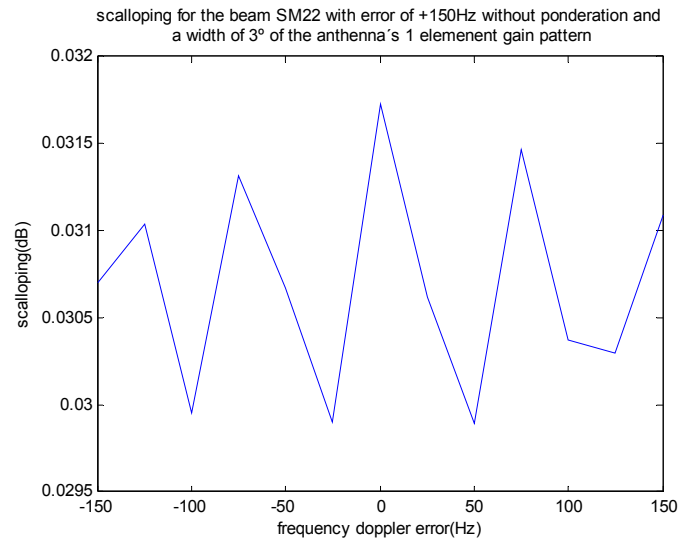
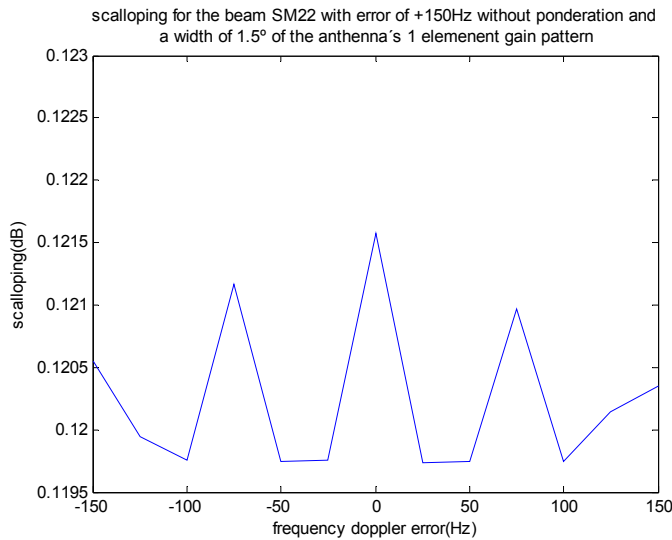
- MODE:SC6 BEAM:SM22
- ERROR FRECUENCIA DOPPLER CENTROID DE 1 ELEMENTO DEL ARRAY:SI(-150Hz)
- PONDERACION:NO
- ANCHURA DE HAZ DE UN UNICO ELEMENTO DEL ARRAY:1.5°,2°,3°,4°

Frequency error	Scalloping power(dB)			
	Width=1.5°	Width=2°	Width=3°	Width=4°
-150	0,1131	0,0641	0,0291	0,0169
-125	0,1119	0,0629	0,0281	0,0166
-100	0,1123	0,0634	0,0292	0,0172
-75	0,1125	0,0635	0,0285	0,0163
-50	0,1119	0,0629	0,0283	0,0167
-25	0,1129	0,0640	0,0294	0,0173
0	0,1119	0,0629	0,0279	0,0161
25	0,1121	0,0631	0,0287	0,0170
50	0,1135	0,0645	0,0298	0,0176
75	0,1121	0,0631	0,0281	0,0166
100	0,1121	0,0631	0,0290	0,0172
125	0,1138	0,0647	0,0297	0,0175
150	0,1119	0,0629	0,0279	0,0165



- MODE:SC6 BEAM:SM22
- ERROR FRECUENCIA DOPPLER CENTROID DE 1 ELEMENTO DEL ARRAY:SI(+150Hz)
- PONDERACION:NO
- ANCHURA DE HAZ DE UN UNICO ELEMENTO DEL ARRAY:1.5°,2°,3°,4°

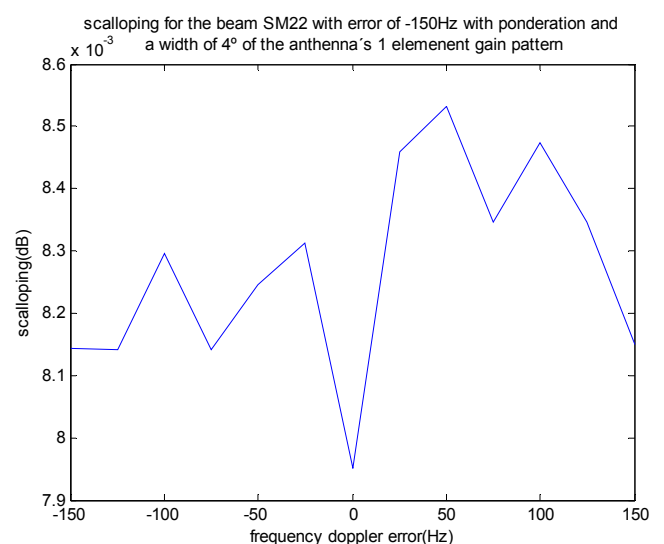
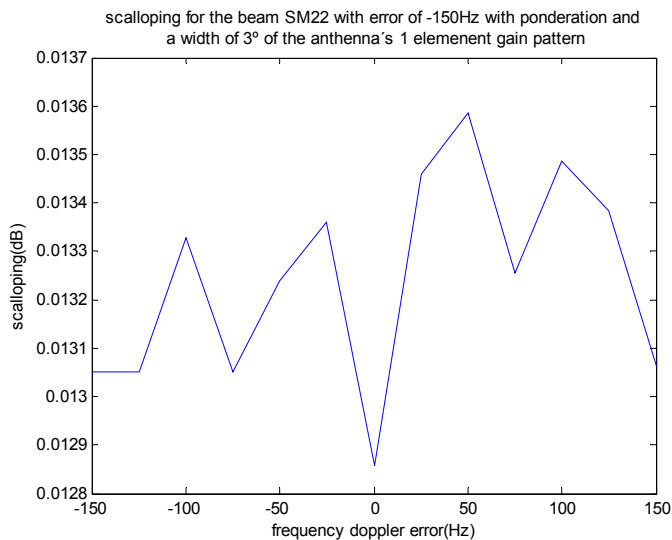
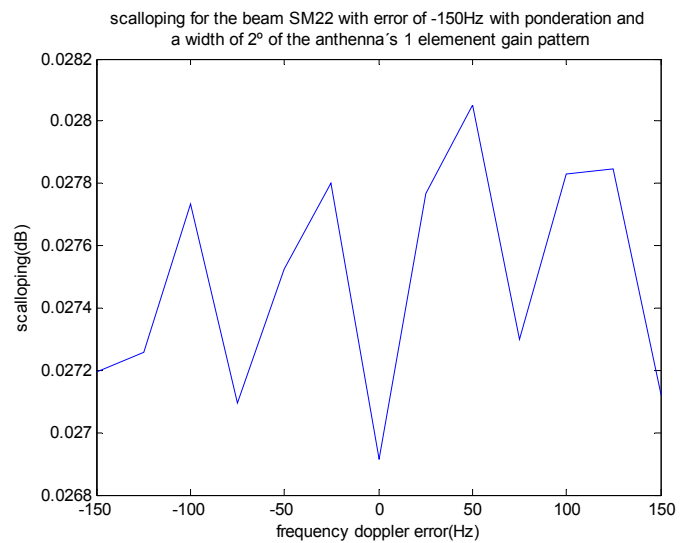
Frequency error	Scalloping power(dB)			
	Width=1.5°	Width=2°	Width=3°	Width=4°
-150	0,1205	0,0680	0,0307	0,0176
-125	0,1199	0,0675	0,0310	0,0182
-100	0,1197	0,0672	0,0299	0,0176
-75	0,1211	0,0687	0,0313	0,0182
-50	0,1197	0,0672	0,0306	0,0179
-25	0,1197	0,0672	0,0298	0,0173
0	0,1215	0,0691	0,0317	0,0186
25	0,1197	0,0672	0,0306	0,0180
50	0,1197	0,0672	0,0298	0,0174
75	0,1209	0,0685	0,0314	0,0185
100	0,1197	0,0672	0,0303	0,0178
125	0,1201	0,0676	0,0302	0,0172
150	0,1203	0,0679	0,0310	0,0182





- MODE:SC6 BEAM:SM22
- ERROR FRECUENCIA DOPPLER CENTROID DE 1 ELEMENTO DEL ARRAY:SI(-150Hz)
- PONDERACION:SI
- ANCHURA DE HAZ DE UN UNICO ELEMENTO DEL ARRAY:1.5°,2°,3°,4°

Frequency error	Scalloping power(dB)			
	Width=1.5°	Width=2°	Width=3°	Width=4°
-150	0,0474	0,0271	0,0130	0,0081
-125	0,0472	0,0272	0,0130	0,0081
-100	0,0479	0,0277	0,0133	0,0082
-75	0,0468	0,0270	0,0130	0,0081
-50	0,0475	0,0275	0,0132	0,0082
-25	0,0480	0,0278	0,0133	0,0083
0	0,0466	0,0269	0,0128	0,0079
25	0,0478	0,0277	0,0134	0,0084
50	0,0483	0,0280	0,0135	0,0085
75	0,0470	0,0273	0,0132	0,0083
100	0,0479	0,0278	0,0134	0,0084
125	0,0481	0,0278	0,0133	0,0083
150	0,0468	0,0271	0,0130	0,0081



- MODE:SC6 BEAM:SM22
- ERROR FRECUENCIA DOPPLER CENTROID DE 1 ELEMENTO DEL ARRAY:SI(+150Hz)
- PONDERACION:SI
- ANCHURA DE HAZ DE UN UNICO ELEMENTO DEL ARRAY:1.5°,2°,3°,4°

Frequency error	Scalloping power(dB)			
	Width=1.5°	Width=2°	Width=3°	Width=4°
-150	0,0469	0,0270	0,0130	0,0081
-125	0,0479	0,0277	0,0133	0,0082
-100	0,0470	0,0270	0,0130	0,0081
-75	0,0477	0,0274	0,0130	0,0081
-50	0,0476	0,0274	0,0130	0,0080
-25	0,0466	0,0269	0,0128	0,0079
0	0,0482	0,0278	0,0134	0,0083
25	0,0475	0,0274	0,0130	0,0080
50	0,0466	0,0268	0,0128	0,0079
75	0,0479	0,0276	0,0131	0,0081
100	0,0474	0,0273	0,0130	0,0080
125	0,0466	0,0268	0,0128	0,0079
150	0,0478	0,0275	0,0131	0,0081

